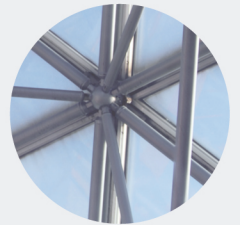


# **CARACTERIZAÇÃO DE ASSIMETRIAS DAS ONDAS INCIDENTES NA PRAIA DE SÃO JACINTO COM RECURSO A SENSORES DE PRESSÃO**

**JAQUELINE DE CARVALHO SILVA**

novembro de 2018



# **CARACTERIZAÇÃO DE ASSIMETRIAS DAS ONDAS INCIDENTES NA PRAIA DE SÃO JACINTO COM RECURSO A SENSORES DE PRESSÃO**

**JAQUELINE DE CARVALHO SILVA**

Outubro de 2018



# **CARACTERIZAÇÃO DE ASSIMETRIAS DAS ONDAS INCIDENTES NA PRAIA DE SÃO JACINTO COM RECURSO A SENSORES DE PRESSÃO**

JAQUELINE DE CARVALHO SILVA

Dissertação submetida(o) para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE INFRAESTRUTURAS**

Orientador: Tiago André Abreu

Co-Orientador: João Emílio Matos (ISEP) e Liliane Frosini Armelin (UPM)

**OUTUBRO DE 2018**



*A minha querida mãe*

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”*

Albert Einstein

# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice de Texto .....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tabelas .....	xv
Abreviaturas .....	xvii
CAPÍTULO 1    Introdução .....	1
CAPÍTULO 2    Revisão Bibliográfica/Metodologia .....	7
CAPÍTULO 3    Campanha de São Jacinto .....	23
CAPÍTULO 4    Resultados .....	35
CAPÍTULO 5    Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	65
Referências Bibliográficas .....	69
Anexos.....	73
Anexo I        – Espectros de Fourier para o Intervalo 1 .....	75
Anexo II       – Espectros de Fourier para o Intervalo 2 .....	77
Anexo III      – Espectros de Fourier para o Intervalo 3 .....	79
Anexo IV      – Espectros de Fourier para o Intervalo 4 .....	81
Anexo V       – Espectros de Fourier para o Intervalo 5 .....	83
Anexo VI      – Espectros de Fourier para o Intervalo 6 .....	85
Anexo VII     – Espectros de Ôndulas para o Intervalo 1 .....	87

## ÍNDICE GERAL

Anexo VIII	– Espectros de Ôndulas para o Intervalo 2 .....	89
Anexo IX	– Espectros de Ôndulas para o Intervalo 3 .....	91
Anexo X	– Espectros de Ôndulas para o Intervalo 4 .....	93
Anexo XI	– Espectros de Ôndulas para o Intervalo 5 .....	95
Anexo XII	– Espectros de Ôndulas para o Intervalo 6 .....	97
Anexo XIII	– Espectros de HHT para o Intervalo 1 .....	99
Anexo XIV	– Espectros de HHT para o Intervalo 2 .....	101
Anexo XV	– Espectros de HHT para o Intervalo 3 .....	103
Anexo XVI	– Espectros de HHT para o Intervalo 4 .....	105
Anexo XVII	– Espectros de HHT para o Intervalo 5 .....	107
Anexo XVIII	– Espectros de HHT para o Intervalo 6 .....	109
Anexo XIX	– Altura Significativa ( $H_s$ ) por Tempo ( $t$ ) .....	111
Anexo XX	– Período de Pico ( $T_p$ ) por Tempo ( $t$ ) .....	113
Anexo XXI	– Coeficiente de Assimetria das Velocidades ( $R$ ) por Tempo ( $t$ ) .....	115
Anexo XXII	– Coeficiente $\alpha$ por Tempo ( $t$ ) .....	117
Anexo XXIII	– Índice Assimétrico ( $r$ ) por Tempo ( $t$ ) .....	119
Anexo XXIV	– Parâmetro de Forma ( $\phi$ ) por Tempo ( $t$ ) .....	121

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise das características não lineares e não estacionárias associadas à hidrodinâmica de ondas em zonas costeiras, objetivando verificar o potencial que metodologias recentes possuem para identificar tais aspectos que são excluídos das hipóteses de dedução das metodologias usuais conhecidas como a Transformada de Fourier e da Teoria Linear das Ondas. No decorrer do texto, são discutidas as considerações teóricas pertinentes ao assunto, associando as assimetrias a definição dos elementos de onda, aos fenômenos presentes na Zona de Transformação das Ondas e ao transporte de sedimentos.

A análise é realizada sob dois aspectos. O primeiro, refere-se a análise espectral onde são aplicadas três Transformadas: a de Fourier, por Ôndulas e a de Hilbert-Huang. O segundo, baseia-se na aplicação de um conjunto de parâmetros matemáticos representativos das magnitudes e assimetrias das ondas, capaz de descrever a hidrodinâmica costeira, proposto por Abreu *et al.* (2011). Para o efeito, as potencialidades destes métodos são exploradas através da sua aplicação a séries temporais da elevação da superfície livre obtidas através de oito sensores de pressão colocados numa campanha de campo realizada na praia de São Jacinto, Portugal, em Junho de 2015.

Os resultados apresentados pelos espectros de Ôndulas e de Hilbert-Huang foram satisfatórios e complementares, sendo capazes de representar as variações das frequências durante o tempo (a nível de não linearidades e de não estacionariedades), uma lacuna deixada pelo Espectro de Fourier. Os parâmetros matemáticos identificaram, para diferentes profundidades, as assimetrias das ondas, permitindo a caracterização dos perfis das ondas para cada variação de maré observada, corroborando com os resultados esperados para ondas incidentes nas Zonas de Transformação e Arrebentação. Foram ainda obtidos os resultados da Altura Significativa da Onda e do Período de Pico, validando a comparação com dados da Boia ondógrafo de Leixões. Em função da localização dos oito sensores na praia, foi possível estudar, usando diferentes filtros de processamento do sinal, o comportamento assimétrico das ondas e demonstrar o aumento das características não lineares conforme as ondas ao largo se propagam para águas rasas.

**Palavras-chave:** Transformada por Ôndulas, Transformada de Hilbert-Huang, Transformada de Fourier, ondas assimétricas, filtros.



## ABSTRACT

This thesis presents an analysis of non-linear and non-stationary characteristics associated with waves' hydrodynamics in coastal zones, with the objective of verifying the potential that recent methodologies have in identifying the aspects that are excluded from the deduction hypothesis of the more usual Fourier Transform and Linear Wave Theory methodologies. Along the text, theoretical considerations regarding the subject are discussed, associating the asymmetries to wave elements definition, the phenomena present at the Wave Transformation Zone, and to sediment transport.

The analysis is done under two aspects. The first being the spectral analysis where three Transforms are applied: Fourier's, Wavelet, and Hilbert-Huang. The second aspect is based on the application of Abreu *et al.* (2011) proposed set of mathematical parameters that represent the magnitude and asymmetries of waves, capable of describing coastal hydrodynamics. In order to do this, the potential of these methodologies are explored by applying them to timed series of free surface elevations obtained from eight pressure sensors placed on a field campaign at the beach of São Jacinto, Portugal, on June 2015.

The results presented by the Wavelet and Hilbert-Huang spectra were satisfactory and complemented each other, being able to represent the frequency variations during time (non-stationarity), a gap that was left by the Fourier Transform. The mathematical parameters identified, for different depths, the waves's asymmetries, enabling wave profile characterization for each observed tide variation, supporting the results that were expected at the Transformation and Surf zones. The results for significant wave height and peak period were also obtained, validating the data comparison with Leixões' directional wave buoy. Due to the location of the eight pressure sensors at the beach, it was possible to study the asymmetrical wave behaviors, using different signal processing filters, and to demonstrate the increase of nonlinearity as longshore waves transform into nearshore waves.

**Keywords:** Wavelet Transform, Hilbert-Huang Transform, Fourier Transform, asymmetrical waves, filters.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Tiago André Abreu, pela confiança na realização deste trabalho mesmo a distância, pela instrução assertiva e segura, paciência e acompanhamento constantes.

Aos co-orientadores, Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> João Emílio Matos e Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Liliane Frosini Armelin, pela solicitude e aconselhamentos concisos, essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

As instituições envolvidas no projeto desta campanha e, em particular, ao Professor Doutor Paulo Silva e ao Doutor Paulo Baptista, ambos da Universidade de Aveiro, pela cedência de dados.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) por abrir as portas de sua instituição e proporcionar todo apoio e suporte necessário de forma exemplar aos alunos estrangeiros.

A Universidade Presbiteriana Mackenzie pela oportunidade de vivenciar as melhores experiências de minha vida tanto no meio acadêmico quanto fora dele.

A minha irmã e meu cunhado, por estarem sempre dispostos a auxiliar nos infinitos momentos em que precisei de ajuda.

Ao meu namorado, Luis, que nos meus momentos de ausência ao estudo superior, sempre fez entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação presente.

Aos amigos, Bianca e Pedro, pelo companheirismo durante o semestre em que vivemos juntos em outro país.

Ao meu grande amigo, Vinícius, pelo grande incentivo desde que o mestrado se tratava apenas de uma possibilidade futura.

Ao amigo e Professor Doutor Sergio Vicente Denser Pamboukian pela motivação constante em todas as atividades acadêmicas que realizei na universidade.

Aos meus primeiros colegas de estágio no Brasil, pelo aconselhamento e torcida nesta importante decisão e, em particular ao meu supervisor, Guilherme, por compreender a importância desta etapa para meu desenvolvimento e transmitir seu conhecimento até o último dia em que trabalhamos juntos.

Por fim, a minha mãe, dedico todo o desenvolvimento deste trabalho, parcela ínfima diante de toda a abnegação e amor incondicional a mim dedicados por ela para a realização deste sonho.





## ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento Geral .....	1
1.2	Motivação.....	1
1.3	Objetivos .....	3
1.4	Justificativa .....	3
1.5	Estrutura.....	5
CAPÍTULO 2	Revisão Bibliográfica/Metodologia .....	7
2.1	Caracterização de Ondas .....	7
2.1.1	Definição e elementos de onda .....	7
2.1.2	Teoria Linear de Ondas (Teoria de Airy).....	9
2.2	Transformações das Ondas .....	10
2.3	Métodos Usuais de Análise de Dados para Transformação de Ondas .....	11
2.3.1	Transformada de Fourier.....	12
2.3.2	Transformada Wavelet (ou Ondaleta) .....	14
2.3.3	Transformada de Hilbert-Huang (HHT) .....	15
2.3.4	Comparação entre os Métodos.....	16
2.4	Caracterização da Assimetria das Ondas .....	18
CAPÍTULO 3	Campanha de São Jacinto .....	23
3.1	A Praia de São Jacinto.....	23
3.2	Descrição da Experiência/Projeto .....	25
3.2.1	Sensores de Pressão.....	28
3.2.2	Informações sobre a maré nos dias da campanha .....	31
CAPÍTULO 4	Resultados .....	35
4.1	Análise Espectral com Dados de Campo .....	35
4.2	Análise das Assimetrias (com dados filtrados).....	52
CAPÍTULO 5	Conclusões.....	65

## *ÍNDICE DE TEXTO*

5.1	Conclusões.....	65
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Direção de vibração e propagação das ondas (FERRARO, 2016).....	8
Figura 2.2 – Elementos de ondas (FERRARO, 2017). ....	8
Figura 2.3 – Formato de onda linear (senoidal). ....	10
Figura 2.4 – Zona de transformação e arrebentação das ondas onde ocorre o processo de empolamento ( <i>shoaling</i> ) das ondas.....	11
Figura 2.5 – Transformada de Fourier. ....	13
Figura 2.6 – Representação gráfica de uma série de Fourier (CHADWICK <i>et al.</i> , 2017).....	14
Figura 2.7 – Gráfico de Sinais (a) e Espectro de Fourier ( $m^2/Hz$ ) (b) (Neves <i>et al.</i> , 2012). ....	16
Figura 2.8 – Espectros de Energia ( $m^2/Hz$ ) (Neves <i>et al.</i> , 2012).....	17
Figura 2.9 – Forma de ondas: Senoidal (Teoria de Airy) e Onda de Stokes.....	19
Figura 2.10 – Forma de ondas: Senoidal ( <i>Sine</i> ) e Dente de Serra ( <i>Sawtooth</i> ) (WIKIPEDIA, 2005).....	20
Figura 2.11 – Velocidade Orbital Instantânea de acordo com a Equação (2.14), para $-\pi/2$ , $-\pi/4$ e 0. Em a) $r = 0,3$ e em b) $r = 0,8$ (ABREU <i>et al.</i> , 2011). ....	21
Figura 3.1 – Região de Estudo: Praia de São Jacinto (GOOGLE MAPS, 2018). ....	24
Figura 3.2 – Imagem de Satélite da Praia de São Jacinto (GOOGLE MAPS, 2018). ....	25
Figura 3.3 – Levantamento Topográfico. Fonte: Acervo da campanha. ....	26
Figura 3.4 – Localização dos Equipamentos (INSTITUTO HIDROGRÁFICO DA MARINHA PORTUGUESA, 2015). ....	27
Figura 3.5 – Foto do <i>SeaGuard</i> durante a campanha. Fonte: Acervo da campanha.....	27
Figura 3.6 – Estrutura para Suporte dos PT na costa. Fonte: Acervo da campanha. ....	28
Figura 3.7 – Localização dos PT em Imagem de Satélite (GOOGLE EARTH, 2018). ....	29
Figura 3.8 – Estrutura para armação do sensor. Fonte: acervo da campanha.....	30
Figura 3.9 – Altura Máxima (m) X Altura Significativa (m) da ondulação ao largo do Ondógrafo de Leixões (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2015). ....	33
Figura 3.10 – Período Máximo X Período Médio da ondulação ao largo do Ondógrafo de Leixões (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2015). ....	33
Figura 4.1 – Intervalos analisados. ....	35
Figura 4.2 – Gráfico de Sinais para a) PT5 b) PT1 durante o intervalo 1. ....	36

Figura 4.3 – Legendas dos Espectros de a) Ôndulas e b) Hilbert-Huang onde o vermelho indica maior concentração de energia. ....	37
Figura 4.4 – Espectro de Fourier para a) PT5 b) PT8 c) PT3 d) PT1 durante o Intervalo 1. ....	38
Figura 4.5 – Espectro de Ôndulas para a) PT5 b) PT6 c) PT8 d) PT7 durante o Intervalo 1. ....	39
Figura 4.6 – Espectro de Ôndulas para a) PT3 b) PT2 c) PT4 d) PT1 durante o Intervalo 1. ....	40
Figura 4.7 – Espectros de a) Ôndulas e b) HHT para o PT5 no Intervalo 1. ....	41
Figura 4.8 – Espectro de HHT para a) PT5 b) PT6 c) PT8 d) PT7 durante o Intervalo 1. ....	42
Figura 4.9 – Espectro de HHT para a) PT3 b) PT2 c) PT4 d) PT1 durante o Intervalo 1. ....	43
Figura 4.10 – Espectros de a) Ôndulas e b) Fourier para o PT8 durante o Intervalo 3. ....	44
Figura 4.11 – Espectro de HHT para a) preia-mar (a e c) e a 2ª baixa-mar (b e d). ....	45
Figura 4.12 – Espectro de Fourier durante a) preia-mar (a e b) e durante a) baixa-mar (c e d). ....	46
Figura 4.13 – Espectro de Ôndulas para a) PT5 c) PT8 e) PT1 durante o Intervalo 3 e b) PT5 d) PT8 f) PT1 durante o Intervalo 4. ....	48
Figura 4.14 – Espectro de Ôndulas para o PT1 durante o a) Intervalo 3 e b) no Intervalo 4. ....	49
Figura 4.15 – Espectro de Ôndulas para o PT1 durante a) baixa-mar e b) enchente. ....	50
Figura 4.16 – Espectros de Ôndulas para o PT5 durante os intervalos a) 1, b) 2, c) 3, d) 4 e) 5 e f) 6. ....	51
Figura 4.17 – Filtros <i>Filtfilt</i> e <i>Butterworth</i> utilizados para obtenção da componente da elevação da superfície livre em altas frequências. ....	52
Figura 4.18 – Comparativo de filtros aplicado ao gráfico de superfície livre do PT3. ....	53
Figura 4.19 – Altura Significativa ( $H_s$ ) em metros para os PT 5, 8 e 1 versus profundidade (h). ....	54
Figura 4.20 – Período de Pico ( $T_p$ ) em segundos para os PT 5, 8 e 1 versus profundidade (h). ....	55
Figura 4.21 – Média dos parâmetros $R$ , $\alpha$ , $r$ e $\phi$ para os PT analisados. ....	57
Figura 4.22 – Coeficiente de Assimetria das Velocidades ( $R$ ) por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8 e c) 1. ....	59
Figura 4.23 – Parâmetro $\alpha$ por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8 e c) 1. ....	61
Figura 4.24 – Índice Assimétrico ( $r$ ) por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8, c) 3 e d) 1. ....	62
Figura 4.25 – Parâmetro de Forma ( $\phi$ ) por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8, c) 3 e d) 1. ....	64

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Posição, Latitude e Longitude dos PT. ....	30
Tabela 3.2 – Posição dos PT.....	31
Tabela 3.3 – Intervalo de medição. ....	31
Tabela 3.4 – Regime de marés durante o intervalo de medição. ....	32
Tabela 3.5 – Dados do Ondógrafo de Leixões nos dias da campanha. ....	34



## ABREVIATURAS

DIPRE	Dissertação Projeto e Estágio
EMD	<i>Empirical mode decomposition</i>
FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFT	Transformada de Fourier
FO	Funções ondaleta
HHT	Hibert-Huang <i>Transformation</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGOT	Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
IH	Instituto Hidrográfico
IMF	<i>Intrinsic Mode Function</i>
INEGI	Instituto Nacional de Estatística e Geografia do México
INTECMAR	Instituto Tecnológico para o Control do Medio Mariño de Galicia
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LT	<i>Level Troll</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PM	Espectro de Pierson-Moscowitz
POCTEP	Programa de Cooperação Transfronteiriça Galiza-Norte de Portugal
PT	Transdutores de Pressão
SIAM	<i>Adaptation Measures</i>
SIAM	<i>Scenarios, Impacts and Adaptation Measures</i>



## *ABREVIATURAS*

TMA	Espectro de Texel, Marsen e Arsloe
UA	Universidade de Aveiro
UPM	Universidade Presbiteriana Mackenzie

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

Este relatório foi produzido no âmbito da unidade curricular de DIPRE, no fim do 2º semestre do 2º ano do Mestrado em Engenharia Civil, no ramo de Infraestruturas, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

A dissertação é reconhecida pelo ISEP e pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), devido ao acordo de Dupla Titulação. No ISEP, a orientação ficou a cargo dos professores Tiago André Abreu e João Emílio Matos e, na UPM, a cargo da professora Liliane Frosini Armelin.

### 1.2 MOTIVAÇÃO

Em uma escala global existem problemas relacionados com a erosão costeira e o transporte de sedimentos, motivando os cientistas cada vez mais a criar metodologias para modelar a morfologia das praias. De acordo com Abreu *et al.* (2011), para solucionar estes problemas é essencial caracterizar o comportamento das ondas em cada local uma vez que as ondas marítimas e as correntes a elas associadas são os principais agentes responsáveis pelo trânsito sedimentar transversal à costa. No entanto, de acordo com Abreu *et al.* (2015) existem muitas lacunas sobre o assunto, atendendo à complexidade dos processos intervenientes. A acrescentar, existe dificuldade na representação dos aspectos não lineares e não estacionários das ondas reconhecidos como influenciadores do trânsito sedimentar.

Há modelos de resolução baseados nas equações de Boussinesq que são capazes de descrever precisamente a transformação das ondas à medida que se aproximam da costa. No entanto, são muito exigentes computacionalmente para aplicação em configurações de morfodinâmica e, portanto, para fins de engenharia prática, por fim, as teorias analíticas simples (linear e não linear) são frequentemente empregadas (ROCHA *et al.*, 2013).

Para análise e caracterização da transformação das ondas, tem-se recorrido a técnicas matemáticas como a Transformada de Fourier (TF). Contudo, os resultados obtidos pelo correspondente Espectro de Fourier têm sido questionados nos últimos anos por não representarem os processos não estacionários e não

lineares presentes em regiões de águas rasas, regiões de geração de ondas e em locais com presença de estruturas.

Alternativamente à TF, existem outras duas transformadas que têm apresentado resultados interessantes por serem capazes de decompor as funções no domínio da frequência e do tempo, a Transformada por Ôndulas (ou *Wavelets*) e a Transformada de Hilbert-Huang ou Hilbert-Huang *Transformation* (HHT) (NEVES *et al.*, 2012).

A Transformada por Ôndulas é capaz de decompor as funções tanto nos domínios da frequência e do tempo, demonstrando ser uma forte ferramenta de processamento de sinais (MATOS, 2017). É muito aplicada na compressão de dados, eliminação de “ruído”, separação de componentes no sinal, identificação de singularidades, detecção de auto semelhança, entre outros, de acordo com Oliveira (2007).

A HHT surge de forma análoga com um forte potencial na representação de problemas não lineares e não estacionários. Segundo Moura (2010), esta ferramenta também pode ser aplicada em problemas 2D, alegando que “apesar de diferentes autores terem utilizado a HHT para o estudo de ondas geradas por vento, há pouca informação sobre a aplicação da HHT. Os trabalhos têm se detido, em sua grande maioria, ao estudo de grandezas escalares.” (p. 47)

Além das transformadas e seus respectivos espectros, Abreu *et al.* (2011), apresenta um conjunto de parâmetros representativos das assimetrias das ondas, capaz de descrever a hidrodinâmica costeira identificando suas não linearidades e não estacionariedades. Essa metodologia pode complementar as análises espectrais, além de evidenciar aspectos que não são considerados na Teoria Linear das Ondas (ou Teoria de Airy).

Em razão disso, o presente trabalho prende-se com a análise comparativa da aplicação de três transformadas, a Transformada de Fourier, a Transformada por Ôndulas e a transformada de Hilbert-Huang, e da determinação de parâmetros que caracterizam as não linearidades das ondas de acordo com a metodologia proposta por Abreu *et al.* (2011), aplicada a séries temporais de sensores de pressão. Em particular, visa-se caracterizar a superfície livre do mar num determinado local, dando enfoque à assimetria das ondas, usando diferentes filtros. Para o efeito, as potencialidades destes métodos são exploradas através da sua aplicação a séries temporais da elevação da superfície livre obtidas numa campanha de campo, através de sensores de pressão colocados na praia de São Jacinto, Portugal, em junho de 2015.

### 1.3 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral caracterizar a hidrodinâmica costeira para a morfologia de praia com foco nas assimetrias apresentadas por ondas geradas por vento em regiões de transformação em águas rasas.

Pretende-se analisar os dados de campo obtidos por um conjunto de sensores de pressão; comparar os métodos de análise de dados de transformação de ondas através de diferentes técnicas espectrais; analisar as assimetrias das ondas na região onde os dados foram coletados, baseando-se em parâmetros representativos das magnitudes e assimetrias das ondas; avaliar a hidrodinâmica costeira para a morfologia da praia de São Jacinto em Aveiro, Portugal.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

A erosão costeira ocorre em 70% das praias arenosas do planeta, o que torna esse processo uma preocupação global (BIRD, 2008). Trata-se de um processo natural que ocorre quando a variação de sedimentos numa praia (balanço sedimentar) é negativa, ou seja, quando a taxa de remoção de sedimentos é maior do que a de deposição.

As causas deste desequilíbrio podem ser naturais, antrópicas ou um resultado da interação entre os dois. Como naturais podemos listar as tempestades, elevação do nível relativo do mar, falta de fonte de sedimentos e correntes paralelas à costa. E dentre as antrópicas tem-se o uso do solo, a retirada de areia para atividades humanas, a construção de barragens, a construção esporões, *seawalls*, entre outros. O resultado é a migração da linha de costa em direção ao continente.

Apesar de ser um fenômeno natural, a erosão pode ser considerada como problema a partir do momento em que causa perdas e danos a propriedades e construções, sejam elas públicas ou privadas.

Em Portugal a erosão é uma preocupação desde a metade do século passado e o fenômeno vem se intensificando devido as alterações climáticas das últimas décadas. De acordo com os resultados obtidos pelo projeto *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* (SIAM) de Aguiar *et al.* (2006), que durou entre 1999 e 2006, um quarto da costa portuguesa apresenta erosão costeira e 67% têm um risco significativo de erosão, sendo que 85% do PIB português depende do litoral devido aos portos e as atividades de turismo.

A praia de São Jacinto, em Aveiro, não é uma praia caracterizada pela incidência de erosão costeira e neste estudo é capaz de fornecer um conjunto de resultados que poderá ser comparado com as demais praias da região que apresentam graves problemas deste tipo, como é o caso da região entre Espinho e Esmoriz analisada por Malafaia, em 2012, que apresentou um recuo que variou entre 85m e 218m no

período entre 1985 a 2007. Esta região sofre por ser caracterizada por forte ondulação marítima no sentido de norte a sul, o que motivou a construção de 6 esporões entre Espinho e Esmoriz. Além disso, em ambiente natural parte da areia que se deposita na praia é transportada do continente e em Portugal existem muitas obras de represamento que interferem no transporte de sedimentos do continente até a costa.

O Brasil possui uma paisagem litorânea muito heterogênea devido a sua grande extensão, dominada por ondas e caracterizada por praias arenosas, falésias sedimentares, estuários, manguezais, lagunas e costões, segundo Neves e Muehe (2008, citado por SOUZA, 2009).

De acordo com o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010, as regiões com maior densidade populacional do Brasil localizam-se no litoral, principalmente nas capitais do norte, nordeste e sudeste. Em 2006, o Ministério do Meio Ambiente realizou o Estudo Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro que apresenta o quadro erosivo dos 17 estados brasileiros que registraram o fenômeno, o estudo informa que 40% das praias do país apresentam algum processo erosivo. Ainda no estudo é interessante notar que muitos deles ocorrem devido a intervenção humana, como ocorreu com a construção do porto no Rio Grande do Sul que possui dois molhes de 3,5 quilômetros de comprimento, para proteger a navegação, que mudaram o perfil da praia do Cassino. A praia ganhou uma faixa de 450 metros de areia desde 1947. Mais ao norte da barreira artificial, a praia do Mar Grosso cumpre o destino oposto e encolhe num ritmo de 1,4 metros por ano num trecho de quatro quilômetros.

Recentemente, em 26 de março de 2018, o Ministério do Meio Ambiente brasileiro instituiu um Programa Nacional para a Conservação da Linha de Costa denominado PROCOSTA, visando o planejamento e gestão da zona costeira com caráter territorial. O programa foi instituído em parceria com instituições e academia, buscando solucionar um importante problema de falta de dados confiáveis em escala nacional e, a partir desses dados, auxiliar na compreensão da atual situação na zona costeira, nas previsões de possíveis alterações futuras e nas alternativas de mitigação e adaptação.

Outro fator relevante são as alterações climáticas, pois o aumento de temperatura global provocará degelo das calotas polares e, conseqüentemente, aumento do nível do mar. Segundo Tschiffeli *et al.* (2015), estas alterações aumentarão o poder energético das ondas provocando mais erosões nas praias ao redor do mundo.

Em vista disso, nota-se que o estudo e a caracterização do comportamento das ondas são essenciais para controle e prevenção da erosão costeira. Somente através disso é possível encontrar a origem dos problemas de erosão e prever os impactos da construção de estruturas de intervenção. Desta forma, o estudo destes processos e a forma de intervir nesta zona dinâmica representa um desafio a nível da Engenharia.

Regra geral, como no Brasil e em Portugal, a representação e caracterização da dinâmica das ondas é feita, usualmente, pela Teoria de Airy e pelo Espectro de Fourier. Contudo, acarretam lacunas por não considerarem os comportamentos não lineares e não estacionários das ondas característicos de águas pouco profundas. Em ambos, assume-se a hipótese que as ondas são lineares, ou seja, senoidais e simétricas, eliminando, entre outros, a possibilidade de descrever matematicamente o transporte de sedimentos das ondas. Por exemplo, a Teoria Linear de Ondas (ou de Airy) considera perfis simétricos de onda que anulam o transporte de sedimentos no ciclo da onda, o que não acontece realmente em muitos casos, como em regiões com barras submersas (ABREU *et al.*, 2011).

Portanto, é primordial que outras possibilidades sejam analisadas para consolidar a sua aplicabilidade em águas pouco profundas. É neste ponto que entram os métodos mais recentes associados às transformadas por Ondaletas e de Hilbert-Huang e aos parâmetros de assimetrias que, através de uma análise do sinal das ondas medido, permitem caracterizar as assimetrias das ondas incidentes nas zonas de transformação e arrebenção.

## 1.5 ESTRUTURA

Tendo em conta o descrito anteriormente, este relatório foi dividido em cinco capítulos, sendo, em seguida, descritos de forma sucinta.

Capítulo 1 – Introduz o tema de dissertação, contextualizando o tema a estudar. São apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho, bem como se descreve a sua organização.

Capítulo 2 – Neste capítulo é efetuado um estado da arte e uma apresentação dos conceitos teóricos base da metodologia adotada. São apresentados os conceitos intrínsecos ao comportamento não linear e não estacionário das ondas de águas rasas, as dificuldades encontradas para caracterização de ondas geradas por vento e os métodos disponíveis utilizados neste estudo: Espectro de Fourier, Técnica das Ondaletas e Transformadas de Hilbert-Huang. Apresentam-se ainda os conceitos relacionados ao método de Abreu *et al.* (2011) para análise e caracterização de assimetrias das ondas.

Capítulo 3 – Neste capítulo é feita uma descrição do local em estudo, a praia de São Jacinto, e da respetiva campanha de campo. Descreve a metodologia adotada para obtenção de informações, assim como, os tipos de sensores utilizados e os resultados (dados) adquiridos.

Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentados os resultados do processamento de dados pelas três técnicas espectrais (dados não filtrados) e faz-se uma caracterização e análise das assimetrias encontradas (dados filtrados) pela metodologia de Abreu *et al.* (2011). Os resultados são discutidos e estabelece-se uma

## *CAPÍTULO 1*

comparação dos resultados obtidos e da sua evolução à medida que as ondas se propagam para águas pouco profundas.

Capítulo 5 – Neste capítulo efetua-se a conclusão do trabalho e propõem-se desenvolvimentos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/METODOLOGIA

#### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS

Para analisar o comportamento das ondas marítimas é importante entender a definição e os elementos de ondas. Há diversas teorias de onda, mas a mais usual, pela sua simplicidade, é a Teoria Linear de Ondas (ou Teoria de Airy). Nesta secção apresentam-se terminologias relacionadas com a geração e propagação das ondas.

##### 2.1.1 Definição e elementos de onda

As ondas aparecem constantemente em diversos fenómenos físicos. São perturbações ou abalos provocados em algum meio e tem a capacidade de propagar energia. Podem ser classificadas segundo o meio ou a forma de propagação.

Quanto ao meio de propagação das ondas, as ondas eletromagnéticas são aquelas capazes de se propagar no vácuo e as ondas mecânicas precisam de um meio vibratório (partículas) para se propagarem.

Quanto à forma de propagação das ondas existem as ondas transversais e as ondas longitudinais. Conforme a Figura 2.1, pode-se notar que as ondas longitudinais vibram na mesma direção em que se propagam e as ondas transversais vibram em uma direção perpendicular à direção da propagação.

As ondas marítimas são ondas mecânicas e transversais.



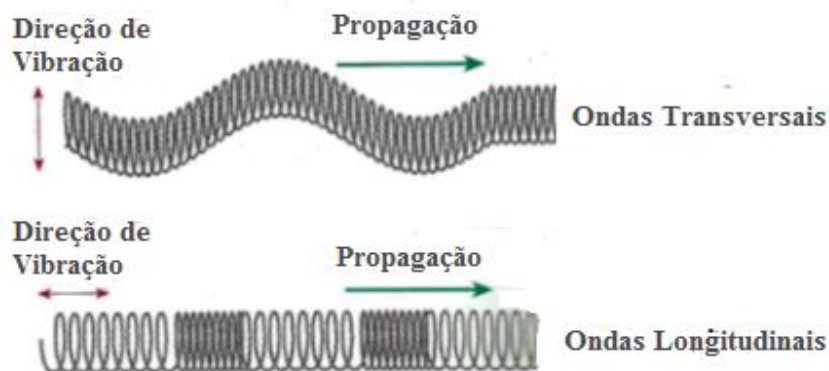


Figura 2.1 – Direção de vibração e propagação das ondas (FERRARO, 2016).

Os elementos de onda são apresentados na Figura 2.2. Tem-se comprimento de onda ( $\lambda$ ), amplitude ( $A$ ), altura ( $H$ ), período ( $T$ ), frequência ( $f$ ), velocidade da onda ( $v$ ), crista e vale.

A crista da onda é o seu ponto mais alto, enquanto o vale (ou cava) encontra-se no ponto mais baixo. A amplitude é a medida que parte do eixo central da onda até seu vale ou até sua crista, não se tratando da altura da onda, que por sua vez representa a distância entre a crista e o vale da onda. O comprimento da onda trata-se da medida entre duas cristas de onda ou dois vales de onda. Esta é a distância que a onda percorre no espaço durante o intervalo de tempo que é necessário para que a onda realize uma oscilação completa. Este intervalo de tempo é denominado período da onda.

De acordo com, Chadwick *et al.* (2017), dada a existência de ondas com período muito pequeno e quase insignificante, é comum ser empregado o termo frequência de onda. Matematicamente, a frequência corresponde ao inverso do período que representa o número de ondas que são geradas por segundo.

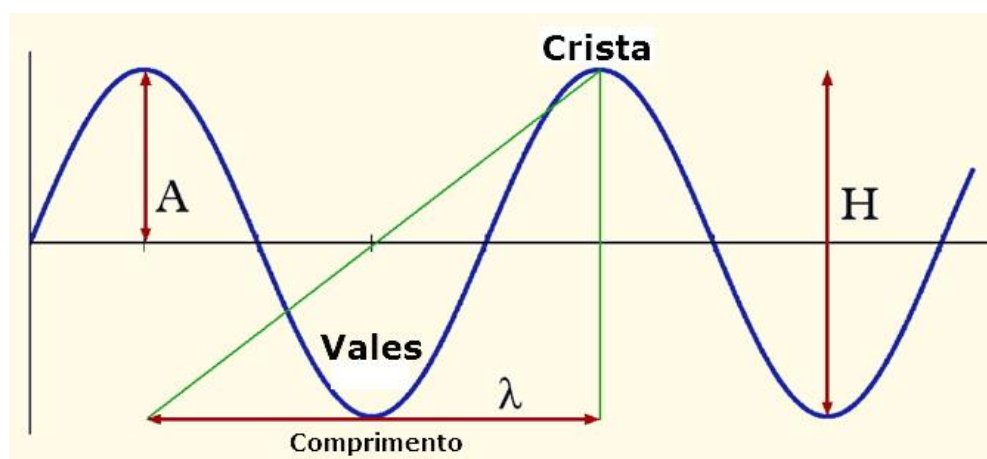


Figura 2.2 – Elementos de ondas (FERRARO, 2017).

A velocidade de propagação ou celeridade ( $v$ ) é a velocidade à qual a onda se propaga. Trata-se do termo mais importante na análise de ondas e depende exclusivamente do meio de propagação. Ela pode ser obtida por meio das Equações (2.2) e (2.3), resultantes da equação básica da velocidade, Equação (2.1):

$$v = \Delta S / \Delta t \quad (2.1)$$

$$v = \lambda / T \quad (2.2)$$

$$v = \lambda \times f \quad (2.3)$$

Onde  $\Delta S$  é a variação de deslocamento,  $\Delta t$  corresponde ao intervalo de tempo em que ocorre  $\Delta S$ ,  $\lambda$  e  $T$  são o comprimento de onda e o período, respectivamente e  $f$  é a frequência de onda.

Como pode-se notar a velocidade é relacionada com o período e consequentemente com a frequência das ondas. Ondas de diferentes frequências se deslocam com velocidades diferentes.

Além disso, de acordo com Chadwick *et al.* (2017), no mar as ondas são geradas principalmente pela ação do vento sobre a água que é seu meio de propagação. Inicialmente sua formação envolve ressonância e cisalhamento, o que gera ondas de diferentes alturas, comprimentos, períodos e direções. Essas ondas podem se propagar em grupos, denominados trens (ou grupos) de onda, por longas distâncias mantendo seu comprimento e período.

### 2.1.2 Teoria Linear de Ondas (Teoria de Airy)

A descrição matemática mais simples e antiga foi atribuída a Airy (1841). Trata-se da tradução do comportamento das ondas por meio de equações que geram os elementos de uma onda representativa. O método apresenta duas importantes simplificações em sua dedução baseadas nos conceitos do escoamento bidimensional de um fluido ideal:

- linearidade: a onda representada possui formato senoidal, simétrico no eixo  $x$  e com duas passagens pelo zero em  $y$ ;
- estacionariedade: onda se propaga em uma frequência constante.

Essas simplificações correspondem ao fato das ondas marítimas apresentarem amplitudes muito pequenas.

É importante observar que a onda representativa da Teoria de Airy transfere apenas energia e não matéria, uma vez que a linearidade (formato senoidal) anula o transporte de sedimentos pela simetria entre a cava e a crista, conforme Figura 2.3. Além disso, assume que a propagação da onda ocorre sem a sua distorção ignorando os fenômenos de empolamento, refração e difração.

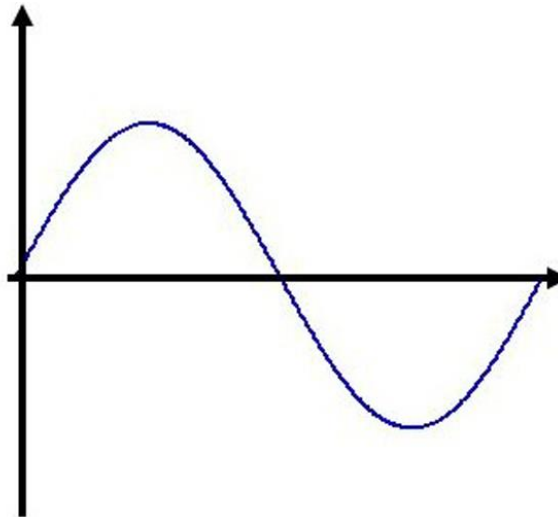


Figura 2.3 – Formato de onda linear (senoidal).

A Teoria Linear de Ondas oferece uma gama de equações que permitem obter a velocidade de propagação e a frequência das ondas, atendendo as necessidades de muitos projetos de engenharia, principalmente ao largo onde não há muita influência do fundo e da viscosidade.

## 2.2 TRANSFORMAÇÕES DAS ONDAS

Quando as ondas se aproximam da zona de arrebentação elas passam por zona denominada zona de transformação (Figura 2.4), assumindo características não lineares e intensificando as características não estacionárias. Nesta zona os trens de ondas deparam-se com a diminuição da profundidade do mar e as estruturas presentes, fazendo com que as ondas sofram interferências que alteram suas características para não lineares e não estacionárias. Os fenômenos que ocorrem devido a estas interferências podem ser denominados empolamento, refração e difração das ondas.

O empolamento é o fenômeno responsável pela mudança do formato das ondas (assimetrias) e sua arrebentação, dois fatores de impacto no transporte de sedimentos. Durante o empolamento, a onda tende a se adaptar a morfologia do fundo do mar até atingir a arrebentação. Segundo Matos (2017), ao entrar em atrito com o fundo, a onda é retardada e seu comprimento diminui enquanto sua amplitude aumenta. A inclinação da onda aumenta até cerca de  $1/7$  quando a água não consegue suportar a si própria e arrebenta.

De acordo com Chadwick *et al.* (2017), é durante a arrebentação que ocorre o transporte vigoroso de sedimentos que compõem o material da praia e a existência de trens de ondas tem grande importância uma vez que já se mostraram serem responsáveis por falhas estruturais em algumas estruturas marítimas projetadas com base na abordagem tradicional (Teoria de Airy). Os autores explicam que os trens de

ondas geram formas de ondas e frequências secundárias bem menores que não são consideradas e que têm grande influência no transporte de sedimentos e na morfologia da zona de arrebentação.

Em razão disso, abordagens modernas têm substituído a onda representativa da teoria de Airy pela curva de densidade de energia espectral que será vista nos espectros dos tópicos seguintes.

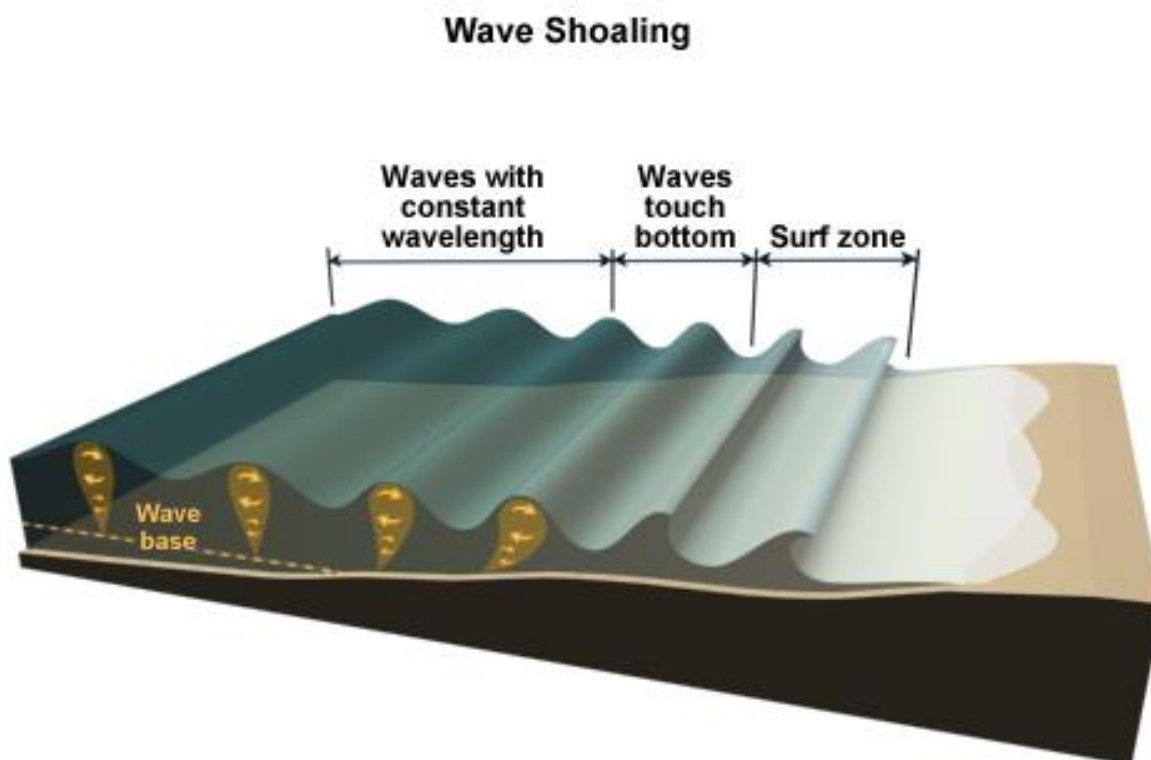


Figura 2.4 – Zona de transformação e arrebentação das ondas onde ocorre o processo de empolamento (*shoaling*) das ondas.

## 2.3 MÉTODOS USUAIS DE ANÁLISE DE DADOS PARA TRANSFORMAÇÃO DE ONDAS

Considerando as diferenças de comportamento entre águas profundas e rasas e as irregularidades do estado de mar produzidas por trens de ondas de diferentes frequências, amplitudes e direções, diversos autores têm recorrido a aplicação das curvas de densidade de energia espectral ou simplesmente aos espectros.

De acordo com Neves *et al.* (2012), o espectro mais utilizado nos últimos 50 anos foi o espectro de Fourier devido a facilidade em traduzi-lo para linguagem computacional. Entretanto, por apresentar restrições quanto a caracterização de ondas não lineares e não estacionárias, assim como a Teoria de Airy, nas últimas décadas, motivou-se a criação e análise de outros métodos que utilizam diferentes espectros para caracterizar o clima de agitação do mar como, por exemplo:

- o Espectro de Pierson–Moscowitz (PM) utilizado em águas profundas quando há necessidade de obter o espectro total das ondas, sem limitações matemáticas quanto a duração da medição dos sinais, por exemplo, em testes de quebra-mares com modelos físicos (CHADWICK *et al.*, 2017);
- o Espectro de JOint North Sea WAve Project (JONSWAP) (HASSELMANN *et al.*, 1973 apud CHADWICK *et al.*, 2017) que foi desenvolvido com base em observações feitas no Mar do Norte (Europa) é semelhante do Espectro PM, porém, matematicamente mais complicado por considerar a velocidade do vento;
- o Espectro de Texel, Marsen e Arsloe (TMA) cujas iniciais correspondem as iniciais dos três conjuntos de dados utilizados para verificação de campo. Trata-se de uma modificação do Espectro de JONSWAP para águas de transição que inclui uma função que depende da profundidade e da frequência (CHADWICK *et al.*, 2017).

Ainda há, por exemplo, outros espectros como os de Bretschneider e Mitsuyasu citados por Dalrymple em 1991 e os aprimoramentos das equações de Boussinesq de Beji e Nadaoka (1996). Entretanto, alguns deles apresentam alta complexidade matemática o que dificulta sua aplicação. Reconhece-se ainda que as equações de Boussinesq produzem bons resultados, mas o custo computacional é elevado, conforme afirmam Rocha *et al.* (2013).

Em estudos recentes a Transformada por Wavelet (LIU, 2000) e a Transformada de Hilbert-Huang (HUANG *et al.*, 1996, 1998) têm demonstrado boa capacidade de representar as características não estacionárias e não lineares das ondas. Em razão disso, são objeto deste estudo e serão detalhados seguidamente, com vista a suprir limitações apresentadas pelo Espectro de Fourier.

### 2.3.1 Transformada de Fourier

Fourier desenvolveu uma técnica cuja base da sua ideia foi a representação de funções periódicas como séries de senos e cossenos. Gonzalez e Woods (1992) definem que a Transformada de Fourier (TF) é utilizada para processar sinais (funções) transformando-os do domínio do espaço para o domínio das frequências, conforme Figura 2.5. A transformada de Fourier dá-nos o conteúdo em frequência ou espectro de dado sinal. Em teoria, o sinal pode ser reconstruído, sabido o seu espectro, usando a transformada inversa.



Figura 2.5 – Transformada de Fourier.

O espectro de Fourier pode representar a superfície do mar por meio da sobreposição de séries de ondas sinusoidais com fases constantes, conforme pode-se observar na Figura 2.6, onde se constrói uma função,  $S(f)$ , que representa a densidade espectral de energia das ondas em função da frequência. Através de uma expansão da série apresentada por Neves *et al.* (2012), é possível representar uma série temporal  $X(t)$  na Equação (2.4), abaixo.

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (2.4)$$

Onde  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$  são os coeficientes de Fourier,  $T$  é o período fundamental e  $t$  é o tempo.

Ainda, de acordo com Neves *et al.* (2012), é nesta descrição que se observam as limitações do método, por sobrepor séries de ondas com fases constantes está explícito que o sistema deve ser linear e estacionário (ergótico). O espectro de Fourier funciona bem quando o objetivo é salientar a informação mais importante presente num sinal temporal  $X(t)$ , mas ao analisar a situação real das ondas geradas por vento surge a necessidade de estudar a variação das características no tempo (não estacionariedade). Na realidade, em muitas aplicações, tais como a análise de sinais não estacionários (isto é, sinais cujas frequências evoluem de forma significativa com o tempo) ou o processamento de sinal em tempo real, a simples utilização da transformada de Fourier não é adequada.

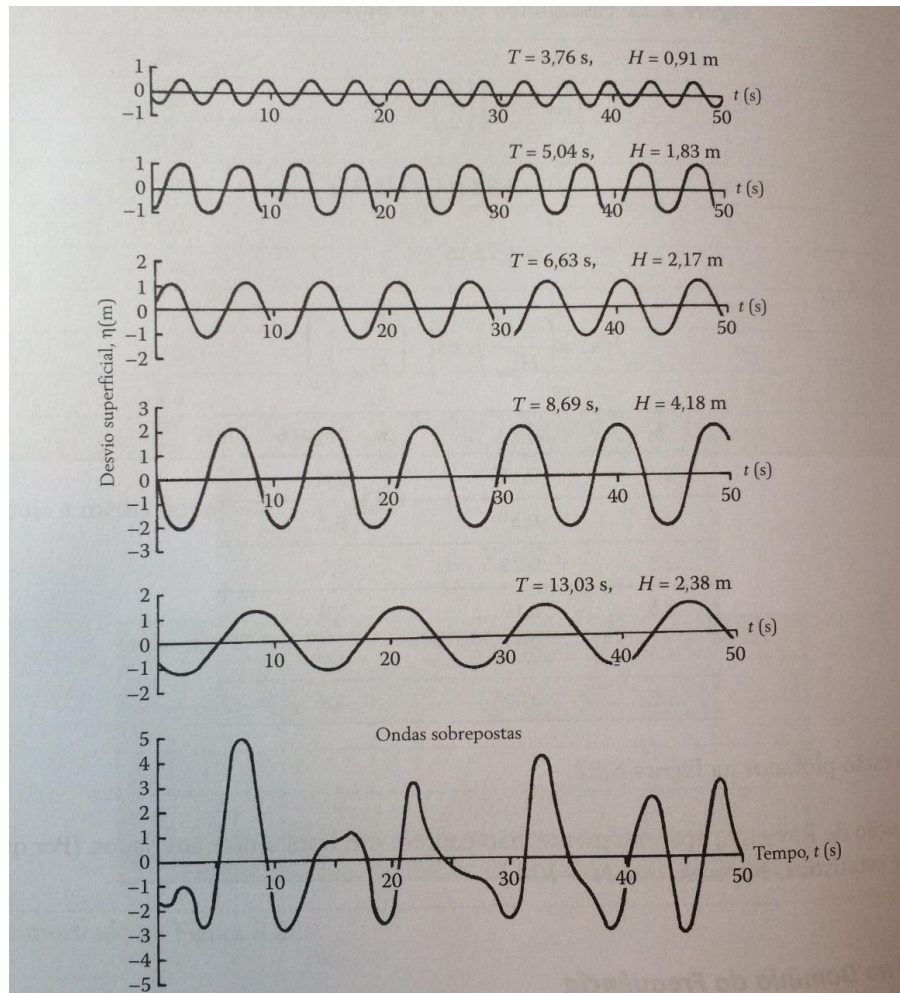


Figura 2.6 – Representação gráfica de uma série de Fourier (CHADWICK *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Transformada Wavelet (ou Ondaleta)

A transformada por ondaleta (wavelet ou ôndula) permite ultrapassar as dificuldades associadas à limitação da transformada de Fourier, permitindo uma melhor análise dos sinais no domínio das frequências. Segundo Oliveira (2007), são capazes de decompor outra função (série de dados), originalmente descrita no domínio do tempo (ou espaço), por outra função em diferentes escalas de frequência e de tempo.

Para Neves *et al.* (2012), esta técnica decompõe funções hierarquicamente e baseia-se na aplicação de Funções Ondaleta (FO), representadas por  $\psi_{j,k}(t)$ , Equação (2.5), sobre a série temporal  $X(t)$ , Equação (2.6).

De acordo com Matos (2017):

“Cada função de ôndulas possui um termo de escalamento, o qual determina a sua contração ou dilatação, e um termo de translação, o qual indica quantas vezes cada função de ôndulas é aplicada sobre a série temporal.”

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \Psi_0\left(\frac{t-k}{j}\right); j \neq 0 \quad (2.5)$$

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \int_{t=1}^N X_{(t)} \Psi_0\left(\frac{t-k}{j}\right) dt \quad (2.6)$$

Onde  $j$  é o termo de escalonamento,  $k$  é o termo de transição que determina a contração e dilatação,  $\Psi_0$  é a ondaleta-mãe e FO é a função ondaleta.

Ainda segundo Neves *et al.* (2012), as FO surgem a partir de uma função ondaleta base (ondaleta-mãe) e atendem a duas propriedades:

- A integral da função deve ser zero;
- A FO deve possuir energia unitária.

De acordo com Barbosa e Blitzkow (2008, citados por NEVES *et al.*, 2012), as equações implícitas nessas propriedades garantem que a ondaleta mãe possui uma localização espacial e que  $\Psi_{j,k}(t)$  tende a oscilar acima e abaixo do eixo  $t$  e que tem sua energia localizada em uma certa região, ou seja, seja finita, ao contrário da TF que possui funções periódicas de energia infinita. Além disso, as FO se localizam na frequência e no tempo, atendendo a necessidade de processos não estacionários.

### 2.3.3 Transformada de Hilbert-Huang (HHT)

A transformada HHT constitui um desenvolvimento recente da Matemática que torna possível a representação de processos não estacionários e não lineares por permitir que sejam obtidas informações instantâneas sobre frequências e amplitudes, cujo conjunto gera o espectro de Hilbert. Segundo Neves *et al.* (2012), isso ocorre porque a HHT se baseia em um método adaptativo de decomposição (EMD - “*empirical mode decomposition*”) em funções intrínsecas ao sistema (IMF - “*intrinsic mode function*”), que traduzem as características de cada sinal sem impor características matemáticas pré definidas, seguido da aplicação da transformada de Hilbert sobre estas funções.

Ainda, de acordo com o autor (NEVES *et al.*, 2012), uma IMF possui duas características básicas:

- ser uma simples oscilação com o mesmo número de extremos e cruzamentos de zero;
- a média entre seu valor de máximo e seu valor de mínimo deve ser zero.

Há um processo repetitivo chamado de peneiramento no qual são decompostas as séries até se obter IMF que atendam as características básicas. Isso facilita a aplicação e a interpretação do resultado obtido pela transformada de Hilbert  $Y(t)$  de uma série temporal  $X(t)$ , conforme Equação (2.7), onde  $P$  indica o valor principal de Cauchy e  $t$  indica o instante a ser calculado.



$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.7)$$

### 2.3.4 Comparação entre os Métodos

Neves *et al.* (2012) apresentaram experimentos comparativos entre os três métodos descritos com séries sintéticas obtidas através do desenvolvimento de um algoritmo em MATLAB que simula a evolução temporal de ondas. O objetivo era demonstrar a ocorrência e a importância de processos não estacionários e não lineares e principalmente ilustrar o tipo de informação que se obtém com cada técnica.

A Figura 2.7 apresenta os espectros de energia obtidos pelos três métodos aqui considerados para a superposição de duas ondas senoidais, colineares, de mesma altura, 1m, e períodos iguais a, respectivamente, 10 e 10,2 segundos.

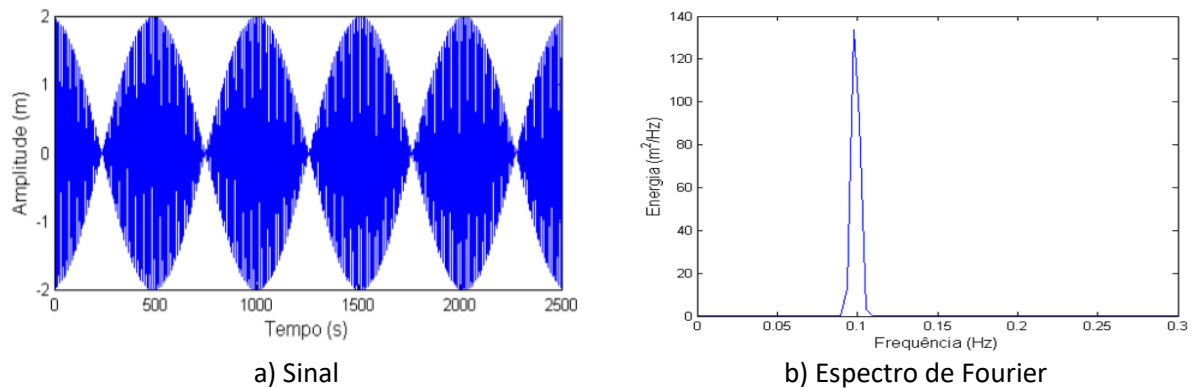


Figura 2.7 – Gráfico de Sinais (a) e Espectro de Fourier ( $\text{m}^2/\text{Hz}$ ) (b) (Neves *et al.*, 2012).

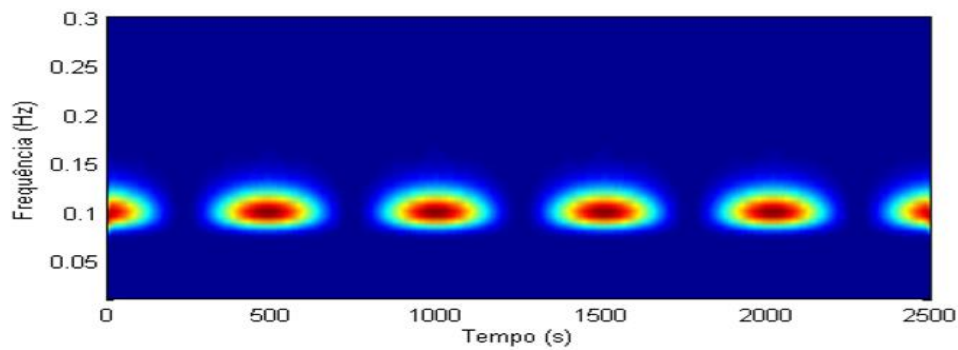
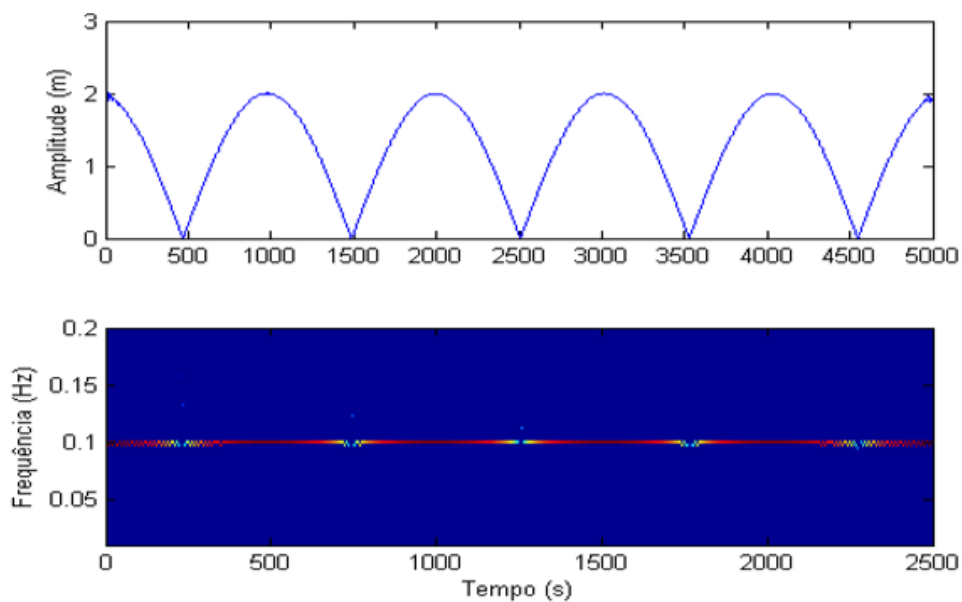
**a) Espectro por Ôndulas****b) Espectro de HHT**

Figura 2.8 – Espectros de Energia ( $\text{m}^2/\text{Hz}$ ) (Neves *et al.*, 2012).

A Figura 2.7 mostra que a transformada de Fourier faz com que as informações (frequência e energia) dos processos ao longo do tempo sejam perdidas. Não se identifica a presença do grupo de ondas, pois a energia parece concentrada numa única frequência, não sendo perceptível que o sinal era composto pela junção de duas frequências muito próximas. As técnicas de Wavelet e a HHT (Figura 2.8) permitem identificá-las, embora seja notável a melhor capacidade da HHT para caracterizar a frequência e a variação de amplitude do grupo de ondas. No mesmo estudo, Neves *et al.* (2012) analisaram processos não estacionários e não lineares em ondas de Stokes e conseguiram identificar as características da não estacionariedade pela técnica de Wavelet e pela HHT. Nesta comparação o espectro de Fourier identificou duas ondas, sendo que a de menor energia possuía duas vezes a frequência da onda com maior energia. Através da técnica de Wavelet, foi possível ver a evolução no tempo das componentes de 1ª ordem. Já os resultados da HHT mostraram claramente as componentes de 1ª e 2ª ordem, manifestado como uma oscilação da frequência instantânea.

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DA ASSIMETRIA DAS ONDAS

Na ausência de correntes marítimas, as ondas simétricas da teoria linear não transportam sedimentos uma vez que o transporte de sedimentos na fase da cava (negativo) é simétrico ao transporte de sedimentos na fase da crista (positivo), anulando-o.

Em alto mar, as ondas comportam-se de acordo com a teoria linear. Entretanto, as ondas perdem essa característica e tornam-se assimétricas (não lineares) ao atingir as águas rasas. Isso deve-se a intensificação da interação com o fundo quando a profundidade diminui. Essa transformação das ondas tem grande influência no transporte de sedimentos pois envolve não somente a forma, mas também os perfis de velocidades e acelerações delas, possibilitando que os sedimentos sejam arrastados em uma direção preferencial que pode ser a mesma direção da propagação das ondas ou a direção oposta (Abreu *et al.*, 2010).

Este fato confirma a necessidade de analisar esses perfis considerando sua forma, velocidade e aceleração. Os métodos usuais da teoria linear deixam uma lacuna que deve ser preenchida para garantir segurança nas aplicações práticas de engenharia. Portanto, procura-se apresentar e contextualizar o método de análise desses aspectos não lineares das ondas aplicado na metodologia do presente trabalho.

Rocha *et al.* (2013) comparou três diferentes parametrizações recentes que tentam estimar as assimetrias para um determinado local, nomeadamente, as de Dibajnia *et al.* (2001), Elfrink *et al.* (2006) e Ruessink *et al.* (2012).

Abreu *et al.* (2011) analisaram e compararam as expressões propostas por Isobe e Horikawa (1982), Drake e Calantoni (2001) e Elfrink *et al.* (2006) capazes de caracterizar as assimetrias de ondas. Estas foram testadas com dados obtidos por sensores de pressão em campanhas de campo, demonstrando a eficácia de cada método para identificar aspectos assimétricos das ondas em praias com barras.

Neste estudo é feita uma análise de dados obtidos por sensores de pressão em campanha de campo de modo similar ao descrito por Abreu *et al.* (2010, 2011).

São analisados parâmetros de séries temporais que estão relacionados com a assimetria das ondas.

Nota-se que a assimetria é um parâmetro adimensional que pode ser obtido de duas formas distintas:

- através do cálculo de momentos estatísticos das séries temporais ou;
- da obtenção de parâmetros simples que relacionam alguns pontos singulares de cada onda dessas séries (p. ex., as magnitudes na crista e na cava).

Abreu *et al.* (2011), propõe o uso dos momentos matemáticos estatísticos denominados desvio padrão,  $\sigma$ , e a assimetria,  $\mu$ , conforme as Equações (2.8) e (2.9):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}{N}} \quad (2.8)$$

$$\mu_{3,x} = \frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^3}{N\sigma_x^3} \quad (2.9)$$

onde  $x$  é uma variável genérica,  $\bar{x}$  a sua média e  $N$  é o número de valores de uma série temporal.

Na definição do método Abreu *et al.* (2011) acrescenta-se que o parâmetro da assimetria:

[...] quantifica a forma da função de distribuição de ocorrências que está relacionada com a assimetria da onda relativamente a um eixo horizontal e assume um valor nulo quando os dados se assemelham a uma distribuição gaussiana. Essa situação corresponde a uma distribuição simétrica em torno da média, como o caso de uma onda sinusoidal. Um valor positivo é representativo de uma distribuição assimétrica com uma cauda que se estende para os valores positivos, indicando um maior peso destes, como o caso de uma onda de Stokes de segunda ordem. O contrário acontece para valores negativos.

Em sua teoria, Stokes (1847) afirma que quando as ondas se aproximam da costa e interagem com o fundo do mar ocorre uma alteração em sua forma, as cristas tornam-se mais curtas e altas, enquanto os vales tornam-se mais longos e rasos, Figura 2.9.

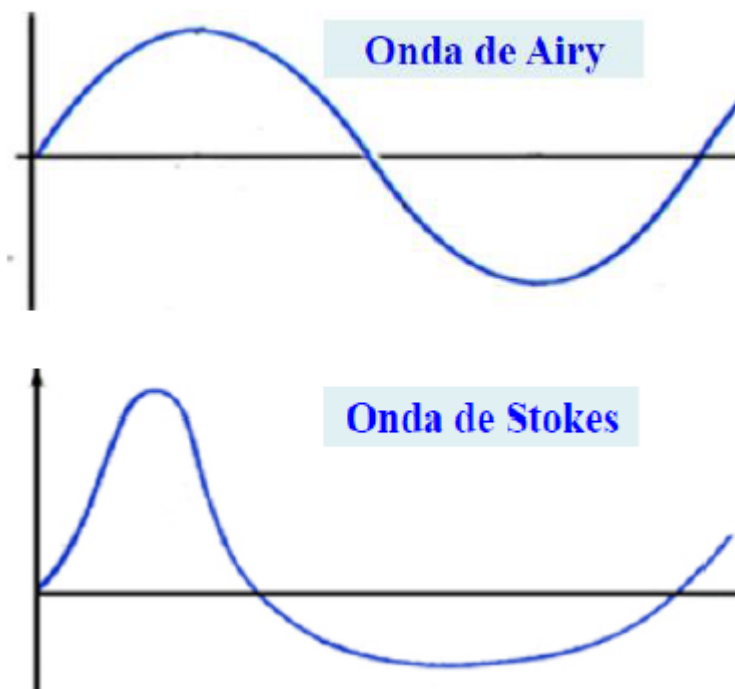


Figura 2.9 – Forma de ondas: Senoidal (Teoria de Airy) e Onda de Stokes.

Este formato de ondas faz com que o movimento das partículas não seja fechado, havendo deslocamento na direção de propagação (*Stokes drift*), o que permite que as ondas transportem sedimentos. De acordo com os resultados demonstrados por Abreu *et al.* (2010), formas de ondas deste tipo podem ser

reproduzidas de forma satisfatória pelo coeficiente de assimetria das velocidades,  $R$ , exposto na Equação (2.10).

$$R = \frac{u_{\max}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (2.10)$$

Onde  $u$  é a velocidade de fluxo horizontal e  $u_{\max}$  e  $u_{\min}$  são os valores de  $u$  na crista e na cava, respectivamente.

Considera-se que ondas simétricas apresentam  $R = 0,5$ . Ondas assimétricas com velocidades maiores na crista (ondas de Stokes) apresentam  $R > 0,5$  e ondas assimétricas com velocidades maiores na cava apresentam  $R < 0,5$ , sendo mais comum a ocorrência do segundo caso em regiões de águas rasas (Abreu *et al.*, 2010).

Além disso, também é interessante apresentar as ondas dente de serra (*sawtooth*) que também são muito comuns em zonas de arrebentação, mas que sendo assimétricas possuem  $R=0,5$  (Figura 2.10).

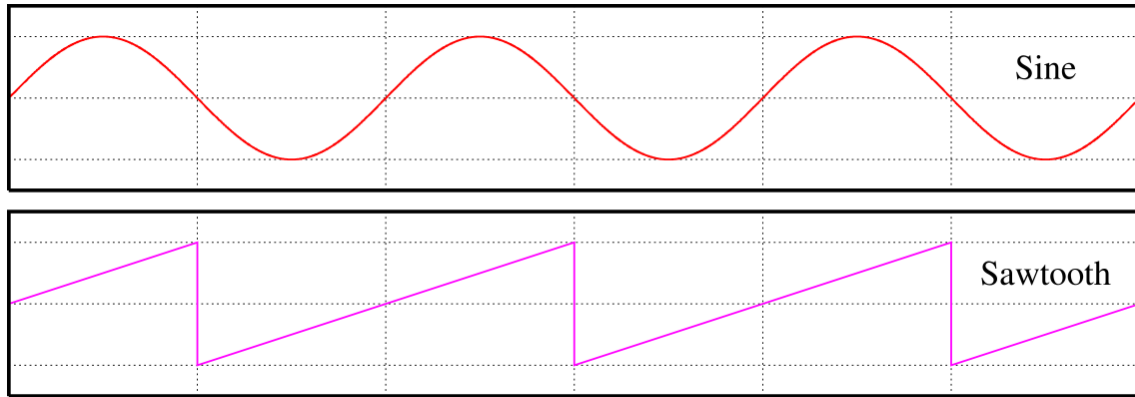


Figura 2.10 – Forma de ondas: Senoidal (*Sine*) e Dente de Serra (*Sawtooth*) (WIKIPEDIA, 2005).

Desta forma, na literatura de Abreu *et al.* (2011) encontra-se outro parâmetro para caracterização deste último tipo de assimetrias. Assim, considera-se o parâmetro  $\alpha$  que é apresentado na Equação (2.11), onde  $T_{pc}$  corresponde ao intervalo de tempo medido a partir do ponto zero ascendente da onda até a ocorrência de  $u_{\max}$  e  $T$  é o período da onda.

$$\alpha = \frac{2T_{pc}}{T} \quad (2.11)$$

Quando  $\alpha = 0,5$  a onda é considerada simétrica em termos da aceleração.

Elfrink *et al.* (2006, citado por ABREU *et al.*, 2010) analisaram um grande número de dados de campo e observaram que o alcance dos parâmetros não lineares estava dentro de  $0,51 \leq R \leq 0,66$  e  $0,22 \leq \alpha \leq 0,54$ .

Além dos parâmetros apresentados, a literatura de Abreu *et al.* (2011) e de Elgar & Guza (1985) propõem outros parâmetros  $r$  e  $\phi$  que também representam aspectos assimétricos das ondas e podem ser

diretamente convertidos a partir de  $R$  e  $\alpha$ . Abreu *et al.* (2010) fornecem as Equações (2.12) e (2.13) que fazem essa conversão:

$$R \approx \frac{a_1 + b_1 \cdot r + r^3}{c_1 - d_1 \cdot r + e_1 \cdot r^2 + r^3} \quad (2.12)$$

$$\alpha \approx \frac{a_3 + b_3 \cdot r + r^3}{c_3 - d_3 \cdot r + e_3 \cdot r^2 + r^3} \quad (2.13)$$

onde  $r$  é denominado o índice assimétrico ou de não linearidade,  $\phi$  é um parâmetro de forma,  $a_i, b_i, c_i, d_i$  e  $e_i$  são coeficientes de ajuste para valores específicos de  $\phi$  ( $i = 1, 3$ ). Além de Abreu *et al.* (2010) apresentarem no seu apêndice B um exemplo numérico da conversão exposta acima, apresentam também a Equação (2.14) que representa a velocidade orbital em função de  $r, \phi, \omega$  e  $U_w$ , sendo  $\omega$  a frequência angular ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ) e  $U_w$  a amplitude de velocidade orbital ( $U_w = (u_{máx} - u_{min})/2$ ).

$$u(t) = U_w \sqrt{1 - r^2} \frac{[\sin(\omega t) + \frac{r \sin \phi}{1 + \sqrt{1 - r^2}}]}{[1 - r \cos(\omega t + \phi)]} \quad (2.14)$$

A Equação (2.14) foi exemplificada por Abreu *et al.* (2011) através da Figura 2.11 onde foram fixados os valores 0,3 e 0,8 para  $r$ , nos gráficos superior e inferior, respectivamente, variando-se o valor de  $\phi$ , entre  $-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}$  e 0. Ilustra-se, por conseguinte, que diferentes combinações dos parâmetros  $r$  e  $\phi$  possibilitam a obtenção de ondas assimétricas de diferentes tipos.

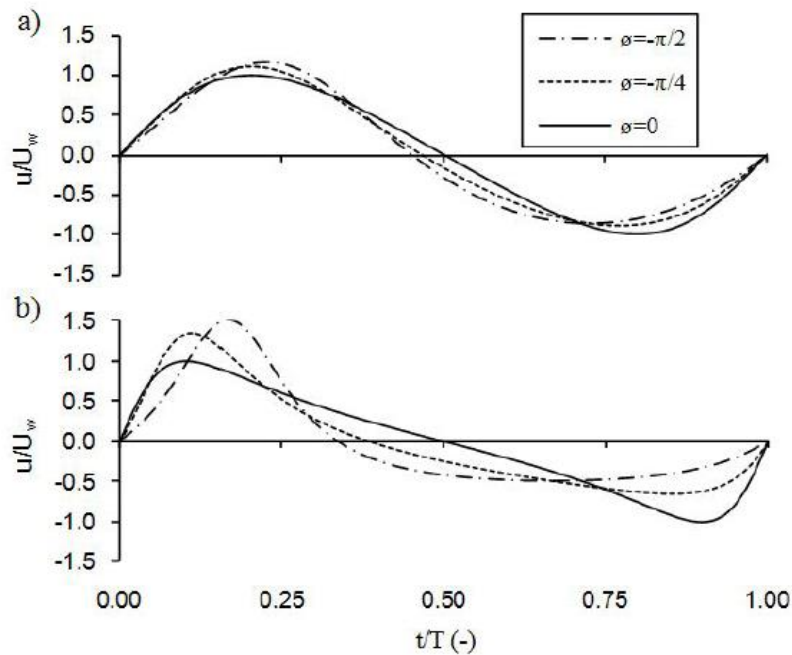


Figura 2.11 – Velocidade Orbital Instantânea de acordo com a Equação (2.14), para  $-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}$  e 0.

Em a)  $r = 0,3$  e em b)  $r = 0,8$  (ABREU *et al.*, 2011).

Na Figura 2.11, pode-se notar que os parâmetros  $r$  e  $\phi$  podem ilustrar ondas Cnoidais e “em dente de serra” a partir da Equação (2.14). Quando  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  as ondas possuem assimetria nas velocidades e valores de aceleração iguais, caso de Onda Cnoidal que apresenta maior magnitude e menor duração na velocidade da crista em relação a velocidade da cava. Quando  $\phi = 0$  as assimetrias são observadas apenas nas acelerações caracterizando as ondas “em dente de serra”. E quando  $\phi = -\frac{\pi}{4}$  observa-se um intermédio entre os dois outros casos, onde notam-se assimetrias nas velocidades ( $u$ ) e nas acelerações ( $\alpha$ ). Através da análise dos dois gráficos contidos na figura é possível observar que quando o valor de  $r$  se aproxima de 0 (zero) as ondas assumem características lineares, ou seja, de uma onda senoidal.

## CAPÍTULO 3

### CAMPANHA DE SÃO JACINTO

Os dados utilizados no estudo de caso pertencem a campanha de campo realizada pelo projeto RAIA e pela Marinha de Portugal, na praia de São Jacinto, em Aveiro, nos dias 18 e 19 de junho de 2015, em parceria com o Instituto Hidrográfico (IH), o *Instituto Tecnológico para o Control do Medio Mariño de Galicia* (INTECMAR), a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), a Universidade de Aveiro (UA), a Universidade de Lisboa, entre outros.

Segundo o Instituto Hidrográfico (2018), o projeto RAIA trata-se de um projeto co-financiado pelo Programa de Cooperação Transfronteiriça Galiza-Norte de Portugal (POCTEP). Foram desenvolvidas infraestruturas observacionais, preditivas e de disponibilidade de dados, que constituem o Observatório RAIA. O observatório transfronteiriço RAIA reúne um grande número de entidades da costa atlântica da Península Ibérica com relevante atividade no campo da oceanografia operacional. Sua missão é fornecer informações confiáveis e úteis sobre o estado do mar para as administrações públicas, empresas e cidadãos em geral. Mais informações sobre o referido observatório podem ser acessada por meio do sítio da internet <http://raia.inesctec.pt/>.

Por tratar-se de uma praia situada na região norte de Portugal em estado natural bem conservado mesmo localizando-se próxima a obras de intervenção marítima, a praia de São Jacinto foi escolhida para realização da campanha de campo em junho de 2015.

#### 3.1 A PRAIA DE SÃO JACINTO

São Jacinto é uma freguesia portuguesa do concelho de Aveiro com 13,84 km<sup>2</sup> de área e 993 habitantes. A leste desta tem-se a Ria de Aveiro e a oeste o Oceano Atlântico (Figura 3.1), cujas coordenadas WGS84 são 40° 39' 44" N, 8° 43' 50" W (INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA E DAS FLORESTAS, 2018).

O acesso a Aveiro é assegurado diariamente por via aquática, através de *ferries* diários de transportes de passageiros e veículos, e pela estrada nacional N327 que faz a ligação com a freguesia da Torreira, concelho de Murtosa, e a cidade de Ovar mais a Norte. Por tratar-se de uma praia de difícil acesso, a praia mantém um estado natural e é limitada a norte pela Reserva Natural das Dunas de São Jacinto com cerca de 600 hectares, conforme Figura 3.1. A reserva está integrada na Zona de Proteção Especial da Ria de



Aveiro com a finalidade de salvaguardar as dunas para impedir o avanço do mar e proteger a biodiversidade, principalmente a população de garças existente no local (INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA E DAS FLORESTAS, 2018).

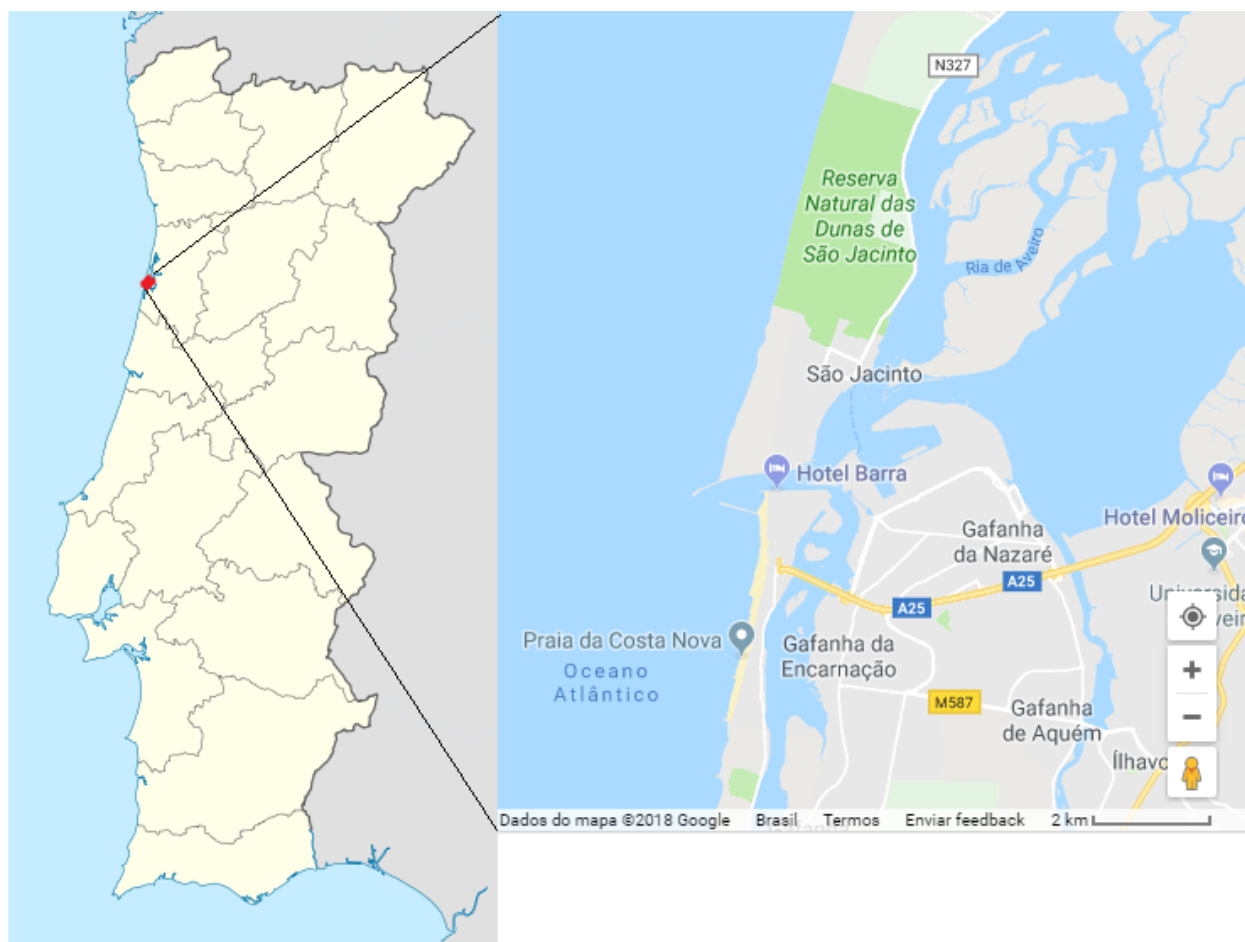


Figura 3.1 – Região de Estudo: Praia de São Jacinto (GOOGLE MAPS, 2018).

Devido a localização da praia é possível praticar esportes radicais como o *surf* e o *bodyboard* do lado da praia e do lado da ria é praticada a vela e a pesca esportiva em razão das águas serem mais calmas e aprazíveis.

Conforme a Figura 3.2, a região do Porto de Aveiro apresenta diversas obras de intervenção, os esporões de entrada, as estruturas próprias do Porto, os dois esporões que protegem o *Ferry-boat*, o Regimento de Infantaria e o Aeródromo de Aveiro, entre outros. Devido ao Esporão Norte de Entrada do Porto de Aveiro a praia ainda apresenta grande extensão de areia que continua a crescer, enquanto, mais ao sul, as praias da Barra, Costa Nova, Costinha e as outras adiante apresentam grandes processos erosivos que motivaram a construção de esporões.

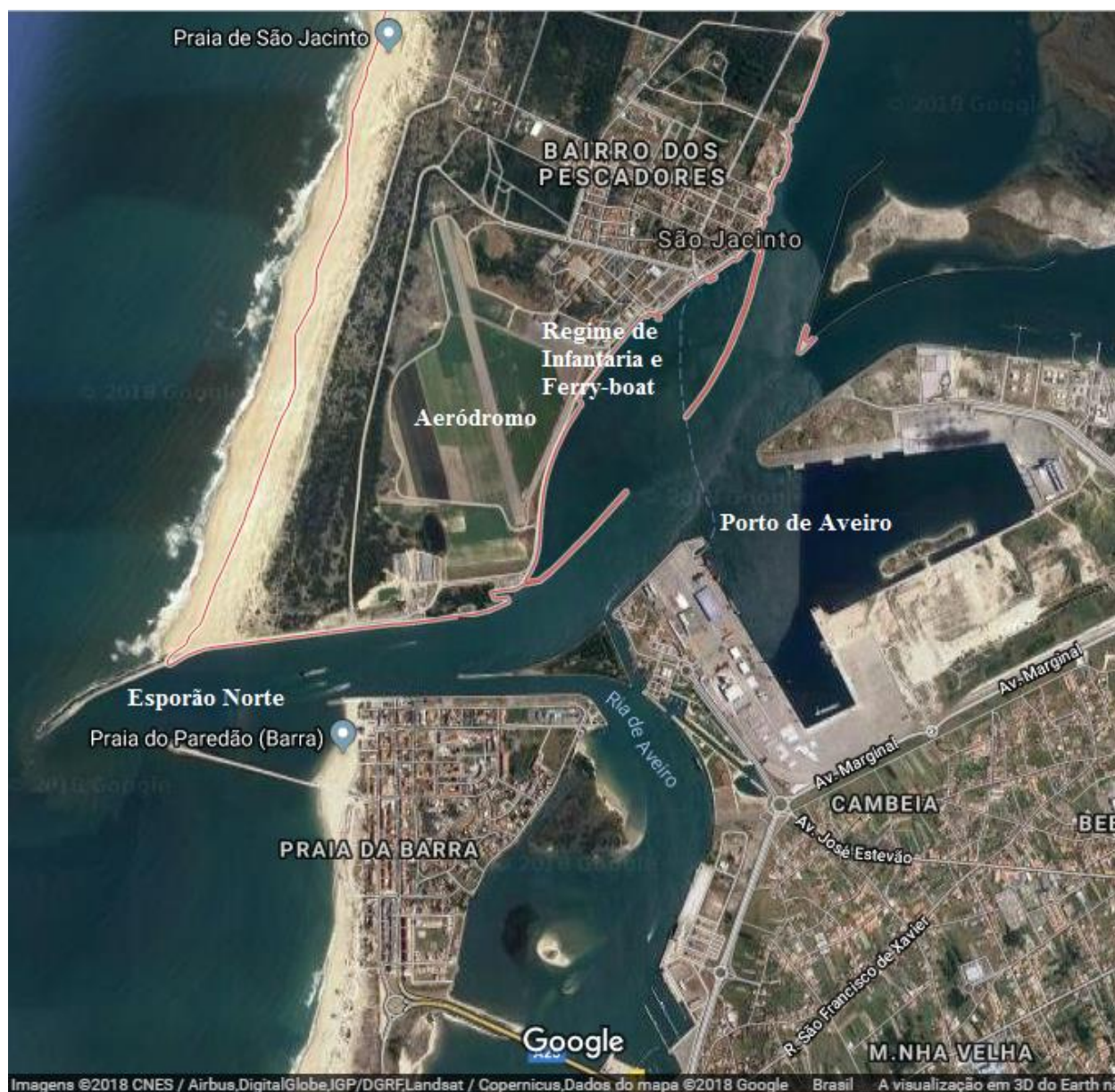


Figura 3.2 – Imagem de Satélite da Praia de São Jacinto (GOOGLE MAPS, 2018).

### 3.2 DESCRIÇÃO DA EXPERIÊNCIA/PROJETO

Como mencionado anteriormente, a campanha de campo foi realizada na praia de São Jacinto durante o verão nos dias 18 e 19 de junho de 2015. A campanha foi realizada no verão porque o mar apresenta comportamento mais seguro para as embarcações nessa estação do ano, pois a costa portuguesa possui maior agitação marítima e consequentemente maior erosão durante o inverno. Durante a campanha, a brigada hidrográfica utilizou o levantamento hidrográfico da área, sendo complementado por um levantamento topográfico realizado por um investigador da Universidade de Aveiro (Figura 3.3).

Foram instalados 17 flutuadores na área de arrebentação complementados com observações diretas da corrente e da turbidez a várias distâncias do fundo e da concentração de partículas em suspensão distribuídas por classes granulométricas.

A Figura 3.4 representa a localização dos equipamentos colocados ao longo de um transepto, podendo encontrar:

- O Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler, do inglês *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), que é um perfilador hidroacústico de correntes que mede a velocidade e a corrente da água num determinado intervalo de profundidade a partir de um princípio físico de propagação de ondas sonoras conhecido como efeito Doppler;
- Os dois *SeaGuard's* que são instrumentos multiparâmetro que podem ser utilizados no mar e em água doce. Os aparelhos dispõem de sensores inteligentes para medição de parâmetros opcionais, tais como, temperatura, pressão, condutividade, oxigênio, ondas e marés (Figura 3.5);
- Os oito Transdutores de Pressão (PT) do tipo *Level Troll* (LT) com os quais pretendeu-se adquirir dados de pressão, de modo a estimar a coluna de água que se encontra acima do PT, obtendo dados da superfície livre como, por exemplo, a altura significativa das ondas que se propagam para a praia (Figura 3.4).

Os dados de coluna d'água obtidos pelos oito PT são utilizados neste estudo e, portanto, são detalhados na próxima sessão.



Figura 3.3 – Levantamento Topográfico. Fonte: Acervo da campanha.





Figura 3.4 – Localização dos Equipamentos (INSTITUTO HIDROGRÁFICO DA MARINHA PORTUGUESA, 2015).



Figura 3.5 – Foto do *SeaGuard* durante a campanha. Fonte: Acervo da campanha.

### 3.2.1 Sensores de Pressão

Conforme descrito anteriormente, neste estudo são analisados os dados dos Transdutores de Pressão, *Pressure Transducer* (PT) em inglês, do tipo *Level Troll* (LT). Um PT tem como função transformar a variável física detectada por um sensor em uma grandeza fácil de ser analisada (TEIXEIRA, 2018). Trata-se de um equipamento pequeno que é instalado em suportes e, durante a campanha, foram instalados 8 PT. A Figura 3.6 exemplifica a instalação de PT instalados próximos da linha de costa, recorrendo-se ao uso de tripés e estruturas metálicas.



Figura 3.6 – Estrutura para Suporte dos PT na costa. Fonte: Acervo da campanha.

Cada PT foi colocado em determinada distância da praia, como é apresentado na Tabela 3.1 e ilustrado na Figura 3.7. Observa-se que a disposição dos PT procura seguir uma linha perpendicular à linha de costa. Desta forma, a análise dos dados possibilita analisar as características das ondas à medida que se propagam em águas rasas.

Como os PT foram colocados a partir de uma embarcação, a diferentes profundidades, foi necessário criar uma estrutura que suportasse os aparelhos durante a aquisição de dados. Apresenta-se na Figura 3.8 de forma esquemática a estrutura utilizada para armação dos sensores de pressão que, depois de afundados em posições devidamente referenciadas, passaram a efetuar as medições. A altura P indicada na Tabela 3.2 corresponde à distância entre a base da poita (sistema de fixação do conjunto ao fundo) e a face do sensor. Esta altura, bem como a consideração da correção associada à profundidade da coluna de água de cada sensor, foi considerada aquando do processamento dos dados do PT.



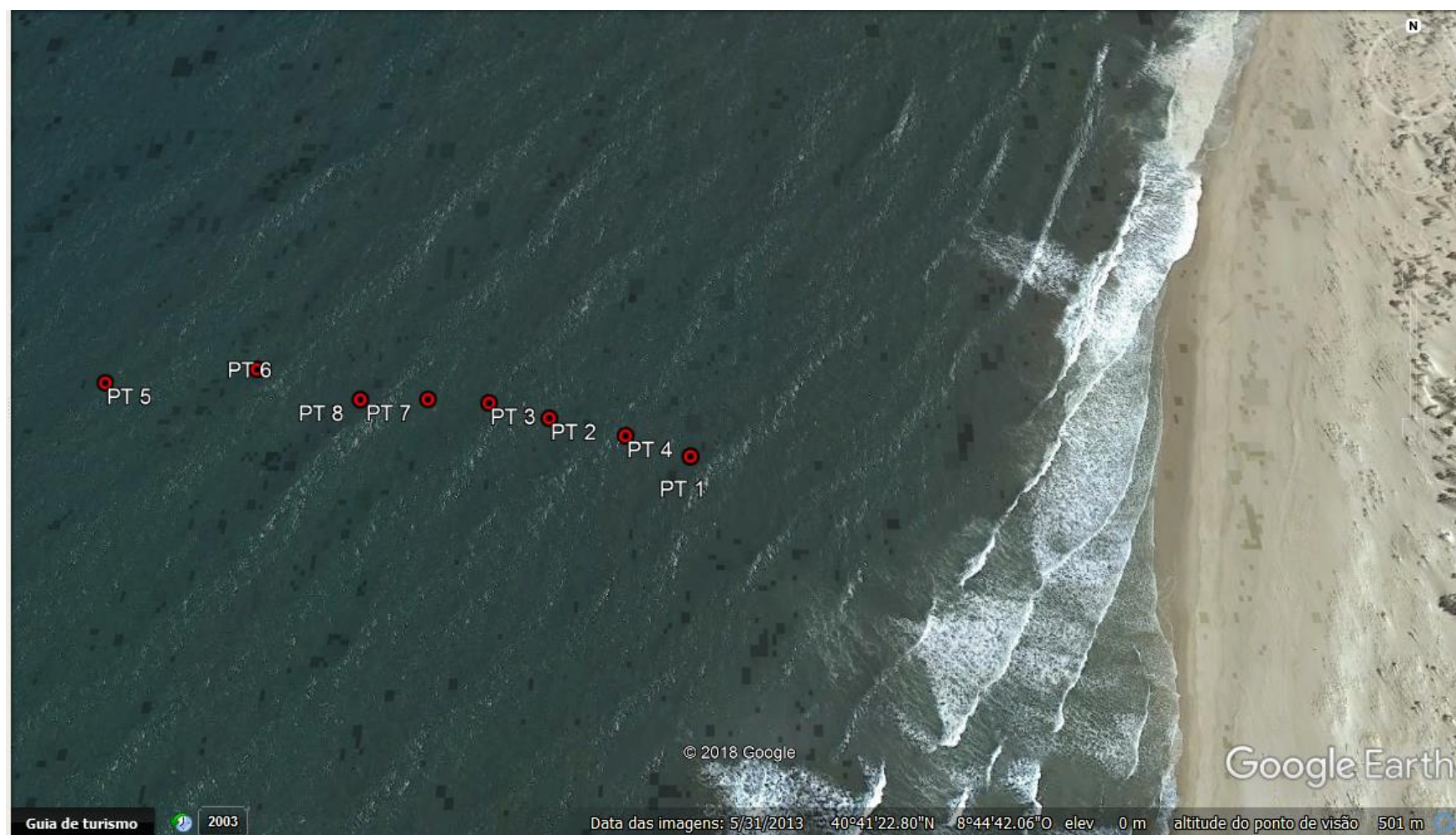


Figura 3.7 – Localização dos PT em Imagem de Satélite (GOOGLE EARTH, 2018).

Tabela 3.1 – Posição, Latitude e Longitude dos PT.

Posição de Fundeamento	Equipamento	Número de Série	Latitude(GPS P)	Longitude(GPS P)
1	ADCP 600kHz	889	40°41.523'N	008°45.619'W
2	Seaguard	586	40°41.518'N	008°45.344'W
3	Seaguard	138	40°41.451'N	008°44.953'W
4	Level Troll UA	177255	40°41.424'N	008°44.800'W
5	Level Troll UA	341728	40°41.428'N	008°44.751'W
6	Level Troll UA	393529	40°41.419'N	008°44.715'W
7	Level Troll UA	340665	40°41.419'N	008°44.693'W
8	Level Troll FCUL	198570	40°41.418'N	008°44.673'W
9	Level Troll FCUL	171772	40°41.414'N	008°44.653'W
10	Level Troll IH	165278	40°41.409'N	008°44.628'W
11	Level Troll IH	165266	40°41.403'N	008°44.607'W
12	SBE IH	3389	40°41.398'N	008°44.574'W
13	SBE IH	3401	Sem informação	Sem informação

Fonte: elaborada a partir dos dados de Latitude e Longitude gerados durante a campanha e disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico.

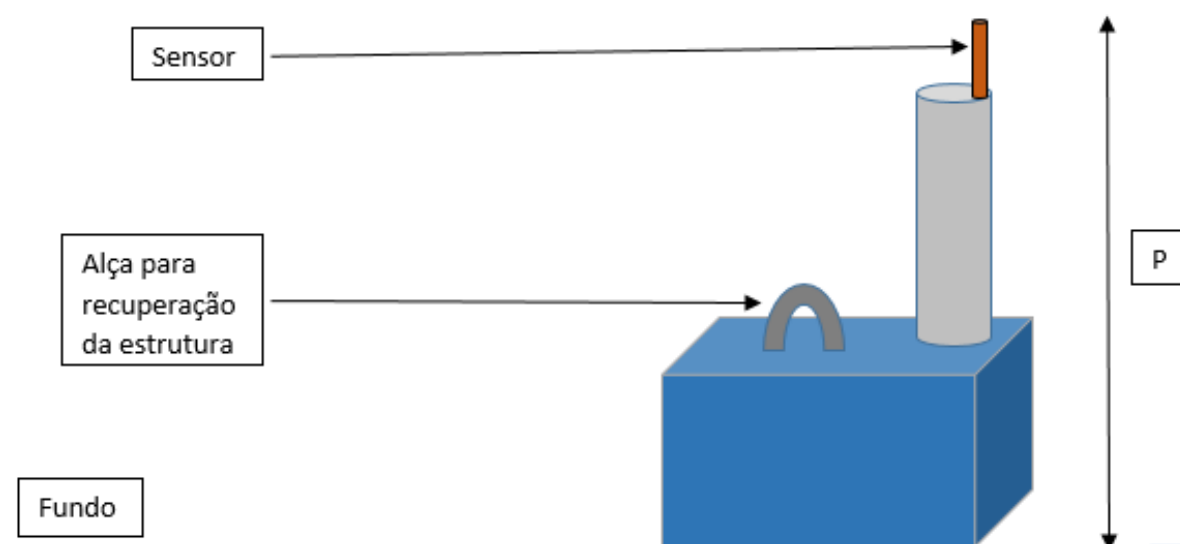


Figura 3.8 – Estrutura para armação do sensor. Fonte: acervo da campanha.

Ainda, a Tabela 3.2 relaciona a posição, o número de série, o número dos PT analisados, a altura  $P$  e o respectivo fundeamento de cada PT.

Tabela 3.2 – Posição dos PT.

Posição	Número de Série	Número PT	P (cm)	Fundamento (m)
4	177255	PT5	76	7
5	341728	PT6	76	5
6	393529	PT8	76	3.8
7	340665	PT7	76	3.5
8	198570	PT3	48	3.2
9	171772	PT2	46	3.0
10	165278	PT4	46	3.2
11	165266	PT1	47	3.6

Fonte: elaborada a partir dos dados de número de série gerados durante a campanha e disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico.

### 3.2.2 Informações sobre a maré nos dias da campanha

Tendo ocupado quase toda a totalidade de um ciclo de maré, as medições iniciaram às 8:00 AM do dia 18 de junho de 2015 e terminaram às 2:07 AM do dia 19 de junho de 2015. Na Tabela 3.3 lista os intervalos de medição dos Transdutores de Pressão PT. A taxa de aquisição de dados foi de 2Hz e o intervalo entre medições de 0.5s.

Tabela 3.3 – Intervalo de medição.

Sensor	Início em 18/06/2018 (horas)	Fim em 19/06/2018 (horas)
PT1	08:00	20:19
PT2	08:00	02:07
PT3	08:00	02:07
PT4	08:00	20:19
PT5	08:00	02:07
PT6	08:00	02:07
PT7	08:00	02:07
PT8	08:00	02:07

Fonte: elaborada a partir dos dados dos sensores de pressão gerados durante a campanha e disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico.



Conforme observado na Tabela 3.4, na costa portuguesa as marés têm um regime semidiurno, podendo-se observar que, durante o período da campanha, todos os sensores registaram dados a diferentes profundidades entre duas baixa-mar e uma preia-mar (destaque sombreado na Tabela).

Tabela 3.4 – Regime de marés durante o intervalo de medição.

Data	Hora	Altura	Maré
18/06/2015	05:09	3.18	Preia-mar
18/06/2015	10:49	0.77	Baixa-mar
18/06/2015	17:28	3.3	Preia-mar
18/06/2015	23:20	0.71	Baixa-mar
19/06/2015	05:49	3.1	Preia-mar
19/06/2015	11:28	0.85	Baixa-mar
19/06/2015	18:06	3.22	Preia-mar

Fonte: elaborada a partir dos dados obtidos durante a campanha sob consulta aos dados do Ondógrafo de Leixões disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico.

Como ponto de referência para estudar a ondulação ao largo no dia da campanha, recorreu-se à boia ondógrafo de Leixões, pois é o local mais perto de Aveiro monitorado com aquisição de dados ao largo pelo IH. Em seu sítio, na internet, o IH disponibiliza as seguintes informações sob a forma de gráficos. De seguida descrevem-se as variáveis habitualmente fornecidas:

- Altura Significativa –  $H_s$  (m): Média do terço mais elevado das alturas de onda registadas durante o período de observação. Corresponde aproximadamente à avaliação visual da altura das ondas;
- Altura Máxima –  $H_{max}$  (m): Máxima altura de onda registada durante o período de observação;
- Período Médio –  $T_z$  (s): Média dos períodos observados no registo. Representa o período típico das ondas registadas durante o período de observação;
- Período Máximo –  $T_{max}$  (s): Máximo período de onda registado durante o período de observação;
- Período de Pico –  $T_p$  (s): Período correspondente à banda de frequência com o máximo valor de densidade espectral. É representativo das ondas mais energéticas presentes no registo.

O Figura 3.9 apresenta a altura máxima (m) e significativa (m) da ondulação ao largo fornecida, para o período de realização da campanha. Observam-se ligeiros decréscimos de  $H_{max}$  e  $H_s$  com, respetivamente, valores médios de 2,2m e de 1,5m.

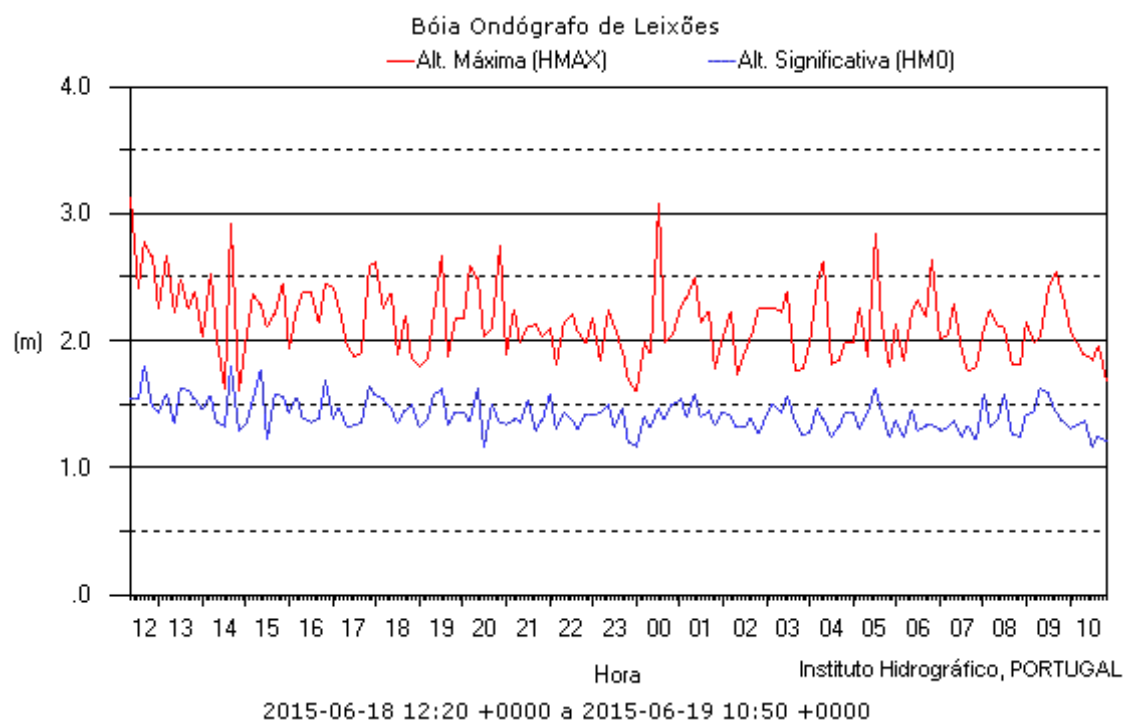


Figura 3.9 – Altura Máxima (m) X Altura Significativa (m) da ondulação ao largo do Ondógrafo de Leixões (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2015).

No Figura 3.10 observa-se o período máximo e o médio da ondulação ao largo, para o período da campanha, situando-se em cerca de 13s e 7s, respetivamente.

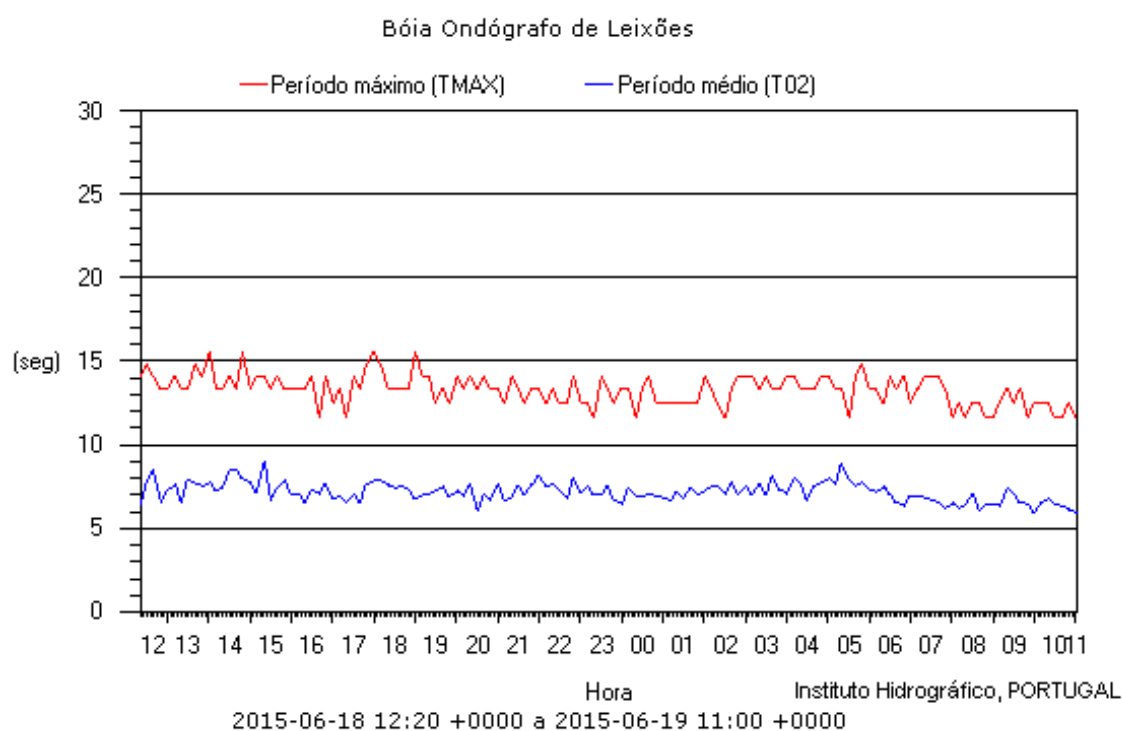


Figura 3.10 – Período Máximo X Período Médio da ondulação ao largo do Ondógrafo de Leixões (INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2015).

A Tabela 3.5 apresenta as informações acima para o período de realização da campanha, 18 e 19 de junho de 2015. Os resultados corroboram os resultados observados nas figuras anteriores, acrescentando-se apenas a informação concernente à direção das ondas que provêm essencialmente de noroeste.

Tabela 3.5 – Dados do Ondógrafo de Leixões nos dias da campanha.

Hora	Dia	Período Médio T02 (s)	Período de Pico TP (s)	Direção das ondas Thtp (°C)	Altura Significativa Hs (m)	Altura Máxima Hmax (m)	Período Médio Tz (s)	Período Máximo Tmax (s)
12	18	7.2	11.8	304	1.62	3.12	7	14.1
15	18	7.1	11.8	301	1.58	2.36	8.1	14.8
18	18	7.3	11.8	303	1.54	2.62	7.9	15.6
21	18	6.7	11.1	300	1.37	2.24	7.2	14.1
0	19	6.7	11.1	303	1.32	1.99	7	13.3
3	19	7.1	11.1	308	1.47	2.26	7.5	14.1
6	19	7	11.1	312	1.37	2.22	7.5	14.8
9	19	6.4	10.5	310	1.52	2.24	6.8	13.3
12	19	6.1	10.5	303	1.28	2.15	6.4	13.3

Fonte: Instituto Hidrográfico (2015).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos por meio de estudo de caso realizado com dados obtidos na Campanha de Campo realizada na Praia de São Jacinto descrita no Capítulo 3 e baseado nas técnicas descritas nos subcapítulos 2.3 e 2.4.

#### 4.1 ANÁLISE ESPECTRAL COM DADOS DE CAMPO

Este capítulo apresenta a avaliação das diferentes técnicas espectrais apresentadas no Capítulo 2.3 quando aplicadas aos dados de pressão obtidos por meio dos oito PT instalados na praia de São Jacinto durante a campanha de campo. Para efetuar a manipulação dos dados recorreu-se ao algoritmo MatLab `apl_hht.m`, criado para aplicação das diferentes técnicas espectrais.

Devido a posse de dados de diferentes posições em relação a costa e em um intervalo de tempo que inclui três mudanças de maré, é possível analisar os dados considerando a variação no tempo e no espaço. Em razão disso e para simplificação do estudo, são analisados seis intervalos de 20 minutos (1200 segundos) para os 8 PT, e cada intervalo, é devidamente posicionado de forma que represente pontos característicos de uma maré. Conforme demonstrado na Figura 4.1 os períodos 1 e 5 correspondem a baixa-mar, os períodos 2 e 6 correspondem as enchentes, o período 4 corresponde a vazante e o período 3 corresponde a preia-mar.

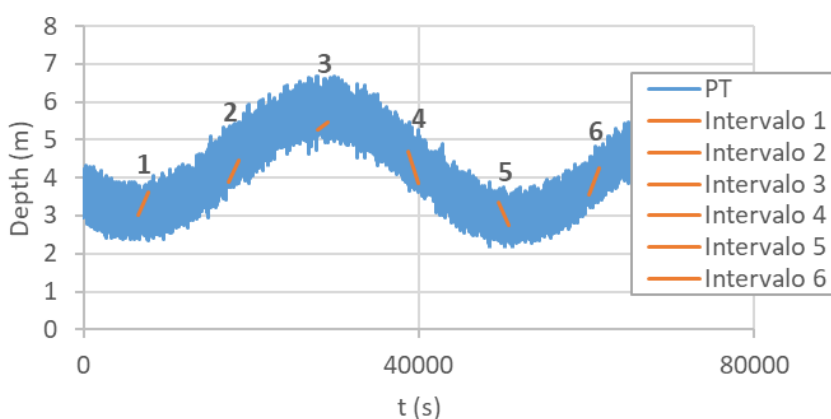


Figura 4.1 – Intervalos analisados.

Para cada intervalo referido acima foram gerados gráficos de Sinais (deslocamento de superfície livre em função do tempo), do Espectro de Fourier (amplitude por frequência), do Espectro de Ôndulas (frequência e amplitude por tempo) e do Espectro de Hilbert (frequência e amplitude por tempo). Devido a quantidade de informação gerada, a totalidade dos gráficos encontra-se na seção de Anexos deste documento, nesta seção são apresentados os gráficos selecionados para melhor apresentação das observações pertinentes.

Os gráficos de Sinais têm a função de representar a submersão dos sensores durante o intervalo em questão e possibilitam, desta forma, a verificação da concordância dos dados com as posições dos PT e marés analisadas. De acordo com os gráficos de Sinais gerados, observou-se que os PT localizados em regiões de ondas ao largo apresentam submersão média maior que a submersão média observada para os PT de águas rasas, resultado este coerente com o esperado, por exemplo, na Figura 4.2, nota-se que para o PT1 tem-se submersão média de 3.1m enquanto para o PT5 tem-se submersão média de 6.75m.

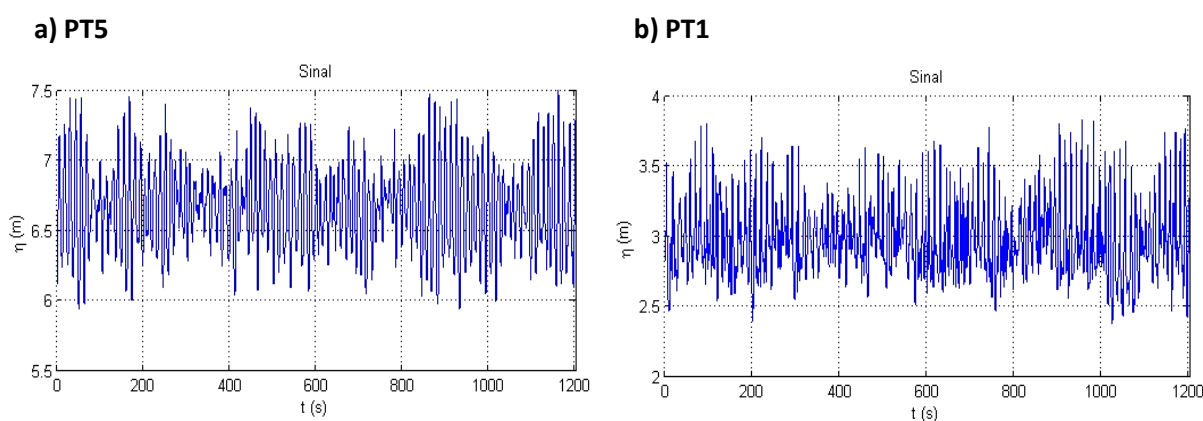


Figura 4.2 – Gráfico de Sinais para a) PT5 b) PT1 durante o intervalo 1.

Partindo para a análise dos espectros de Ôndulas e de Hilbert e para garantir o bom entendimento geral dos gráficos, estão expostas as legendas de cores dos espectros na Figura 4.3 para um dado sinal. Nessa escala de cores, nota-se que a magnitude (amplitude ou intensidade) do sinal resultante de cada técnica espectral é diferente e, portanto, não é comparável. No entanto, a intensificação das cores distribuída pelas frequências ao longo do tempo permite efetuar uma análise comparativa entre ambos resultados. Como os resultados obtidos pelo Espectro de Ôndulas e pelo Espectro de Hilbert foram sempre concordantes, confirmando a complementaridade de ambos os métodos, apresentam-se neste texto, sobretudo, as figuras geradas pela Transformada por Ôndulas.

Iniciando pelo Intervalo 1, tem-se, na Figura 4.5 e na Figura 4.6, o comportamento das ondas durante a 1ª baixa-mar por meio de Espectros de Ôndulas que seguem a ordem do largo para a costa. Observa-se que o Espectro de Ôndulas é capaz de identificar os grupos de ondas e as variações de frequência durante o tempo. Por exemplo, para o PT5, na Figura 4.4 a) notam-se grupos de onda, entre os 50 e os 200

segundos por meio da variação de energia que aparece e desaparece em torno de 0.09Hz. Essa frequência é corroborada com o que está expresso na Figura 4.4 a), onde está exposto o resultado obtido pelo Espectro de Fourier. Essa intermitência da energia que ora aparece e desaparece do sinal é uma característica da presença de grupos de onda.

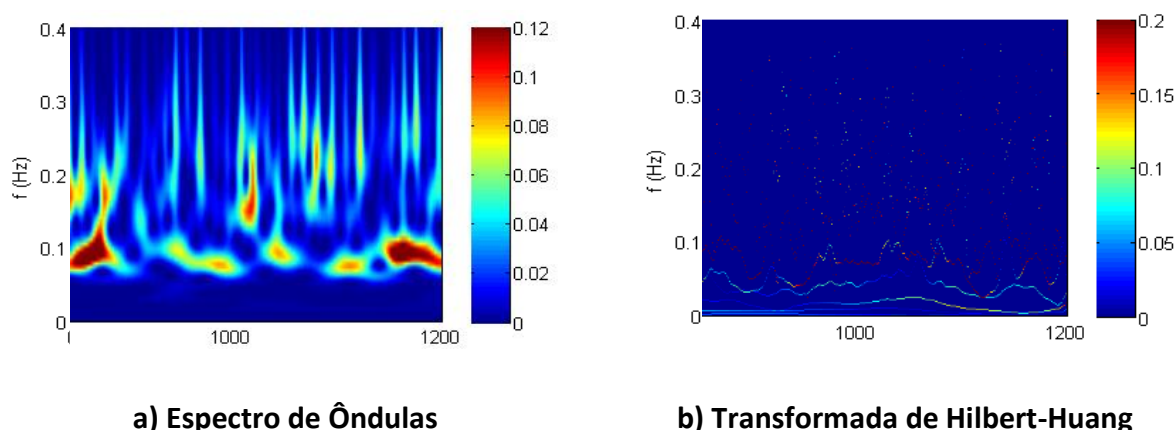


Figura 4.3 – Legendas dos Espectros de a) Ôndulas e b) Hilbert-Huang onde o vermelho indica maior concentração de energia.

Conforme a análise passa para os PT mais próximos da costa (Figura 4.4 c) e d) e Figura 4.5), nota-se que há uma transmissão de energia para uma frequência secundária em torno de 0.17Hz. Essa frequência corresponde a cerca do dobro da frequência principal, 0.09Hz, também em concordância com o Espectro de Fourier da Figura 4.4. Essa clara transmissão de energia merece ser investigada de futuro pois, entre outros, pode estar relacionada com características não lineares das ondas associadas a características morfológicas que a praia apresenta (e.g., barras litorais). No entanto, no local dos instrumentos não existe uma boa resolução do detalhe da batimetria durante o decorrer da campanha que permita efetuar essa análise ou suportar essas conclusões.

Não obstante de o Espectro de Fourier ser capaz de apresentar quais são as frequências onde se encontram as maiores amplitudes, este método não apresenta o intervalo de tempo nos quais estes fenômenos acontecem. O comportamento presente nos Espectros de Ôndulas dos PT mais próximos da costa confirmam também a capacidade da técnica em identificar características não lineares, uma vez que, há um certo espalhamento de energia para frequências maiores. Além da alteração na frequência citada, nota-se ainda uma diminuição de energia, principalmente no PT1, onde se vê cores mais voltadas para o amarelo e verde.

Por exemplo, é possível identificar a capacidade dos espectros de captar a dissipação de energia, observando, o intervalo de tempo entre 200 e 250s nos gráficos apresentados na Figura 4.4 e na Figura 4.5, notando-se que o grupo de ondas que passou pelo PT5 tem sua energia dissipada quando alcança o PT1.

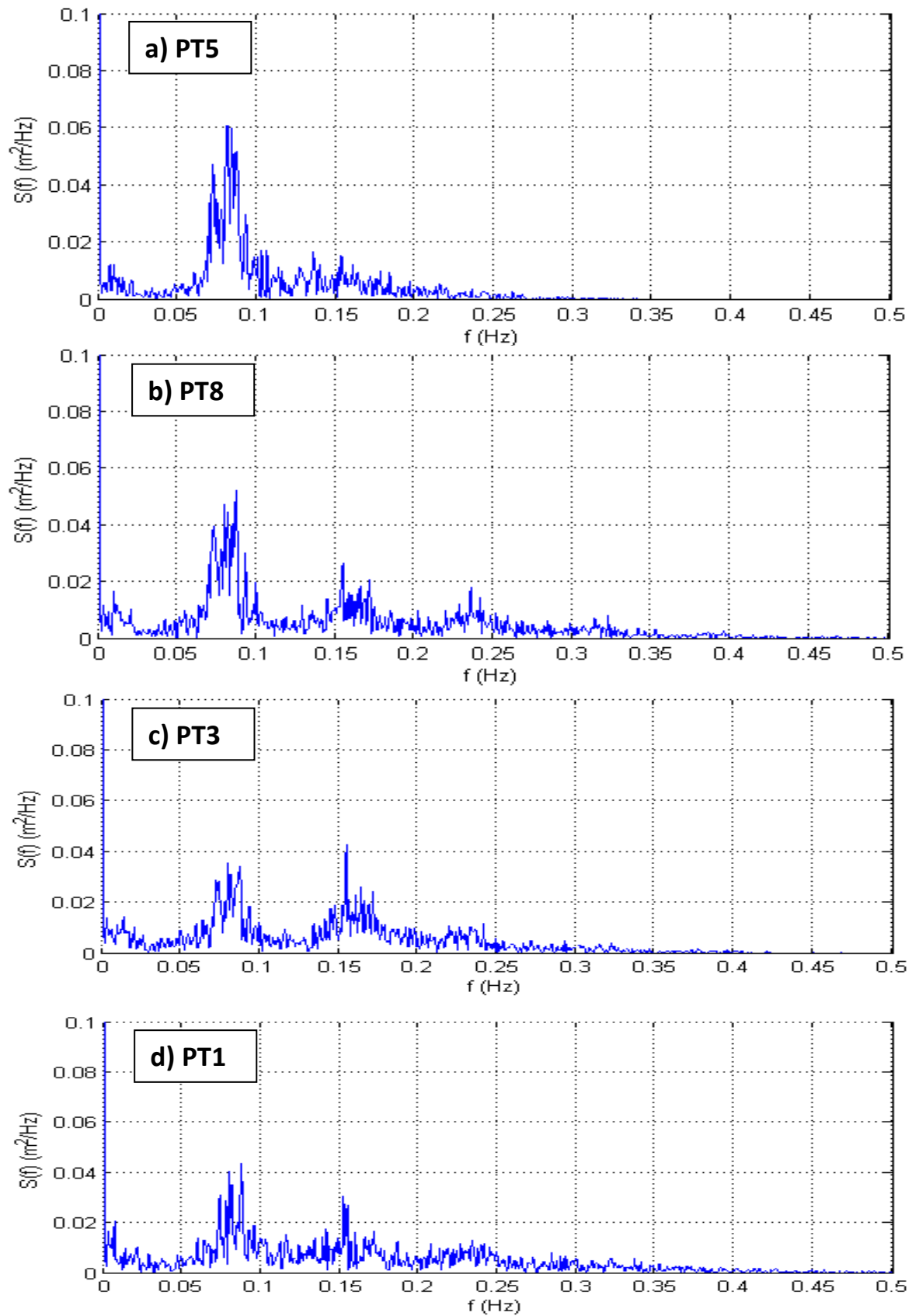


Figura 4.4 – Espectro de Fourier para a) PT5 b) PT8 c) PT3 d) PT1 durante o Intervalo 1.

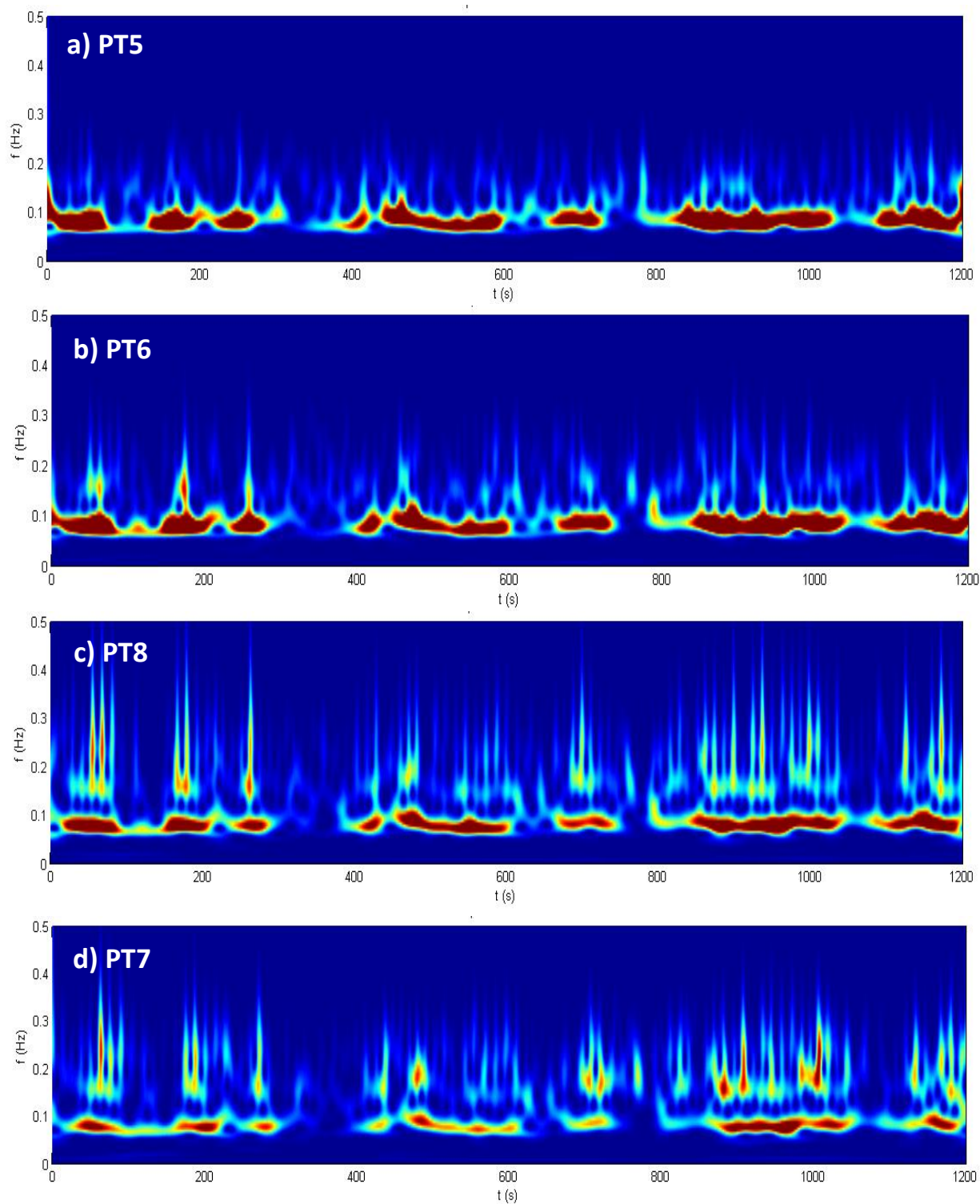


Figura 4.5 – Espectro de Ôndulas para a) PT5 b) PT6 c) PT8 d) PT7 durante o Intervalo 1.



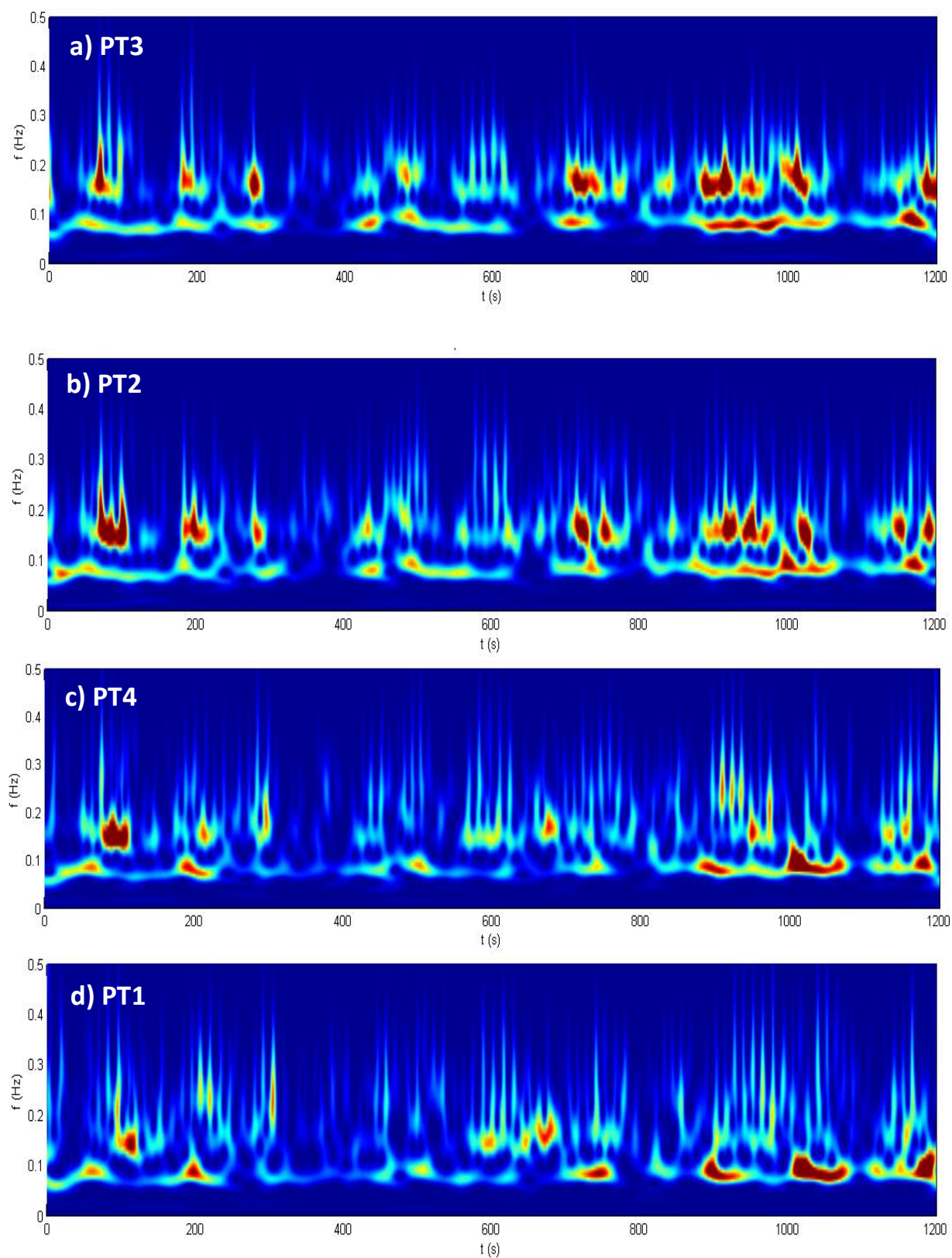


Figura 4.6 – Espectro de Ondulas para a) PT3 b) PT2 c) PT4 d) PT1 durante o Intervalo 1.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9 apresentam os Espectros da Transformada de Hilbert-Huang obtidos para o Intervalo 1 com os dados dos PT seguindo a ordem do largo (PT5) para a costa (PT1). A HHT é capaz de demonstrar a variação instantânea das frequências traduzindo o aspecto não estacionário das ondas com maior precisão que o Espectro das Ôndulas. O Espectro de Ôndulas apresenta regiões de maior energia, mas não caracteriza a variação instantânea dela, mostra-se eficiente para identificar uma variação temporal em um intervalo de tempo maior. Entretanto, não apresenta o que ocorre dentro das regiões de concentração de energia como a HHT que marca os pontos de energia para cada segundo. Para melhor entendimento, apresenta-se ainda a Figura 4.7, onde é feito um *zoom* entre intervalo 0s e 350s. O retângulo vermelho do Espectro de Ôndulas destaca o intervalo onde há uma concentração de energia entre 0.06Hz e 0.09Hz, em contrapartida o retângulo do Espectro de HHT destaca a mesma região onde é possível observar que a frequência em torno dos 150s está aumentando a partir de 0.04Hz até atingir 0.09Hz em 200s.

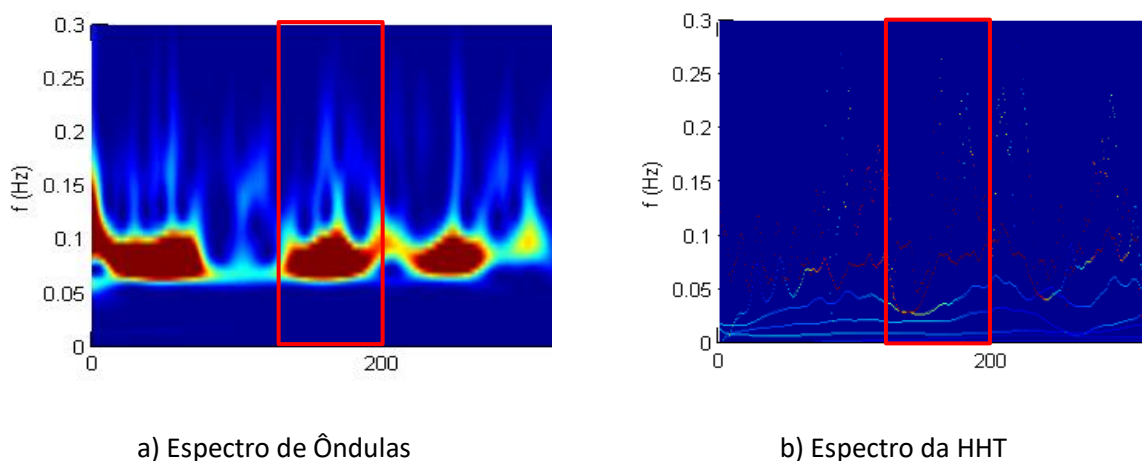


Figura 4.7 – Espectros de a) Ôndulas e b) HHT para o PT5 no Intervalo 1.

Quanto a verificação das alterações nas frequências das ondas conforme elas viajam pela zona de transformação, ainda na Figura 4.8 e a Figura 4.9, nota-se que o Espectro de HHT apresenta para o PT5, Figura 4.8 a), grupos de onda com frequências bem definidas pela maior magnitude energética (cor vermelha) entre 0.05Hz e 0.1Hz e ondas com menor magnitude energética em frequências mais baixas, entre 0.01Hz e 0.03Hz. Essas características se mantêm até o PT3, destacando-se o PT8, da Figura 4.8 c), onde a região entre 0.05Hz e 0.1Hz encontra-se ainda mais definida. A partir do PT2 até o PT1, na Figura 4.9, as oscilações aumentam e as curvas vermelhas do gráfico apresentam descontinuidades, esse efeito corresponde as variações de frequência características de ondas não lineares e não estacionárias, incidentes em águas rasas.

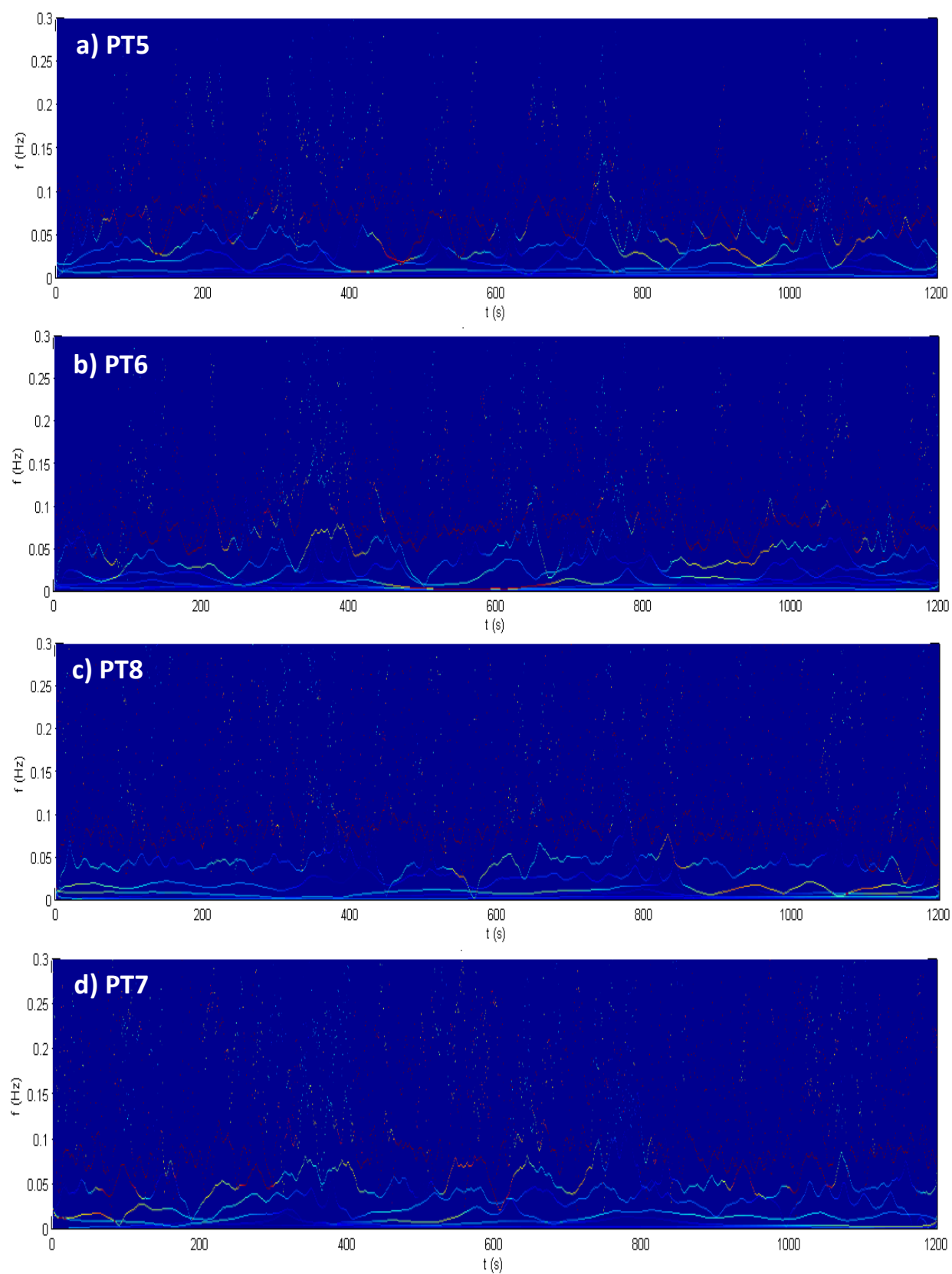


Figura 4.8 – Espectro de HHT para a) PT5 b) PT6 c) PT8 d) PT7 durante o Intervalo 1, na baixa-mar.

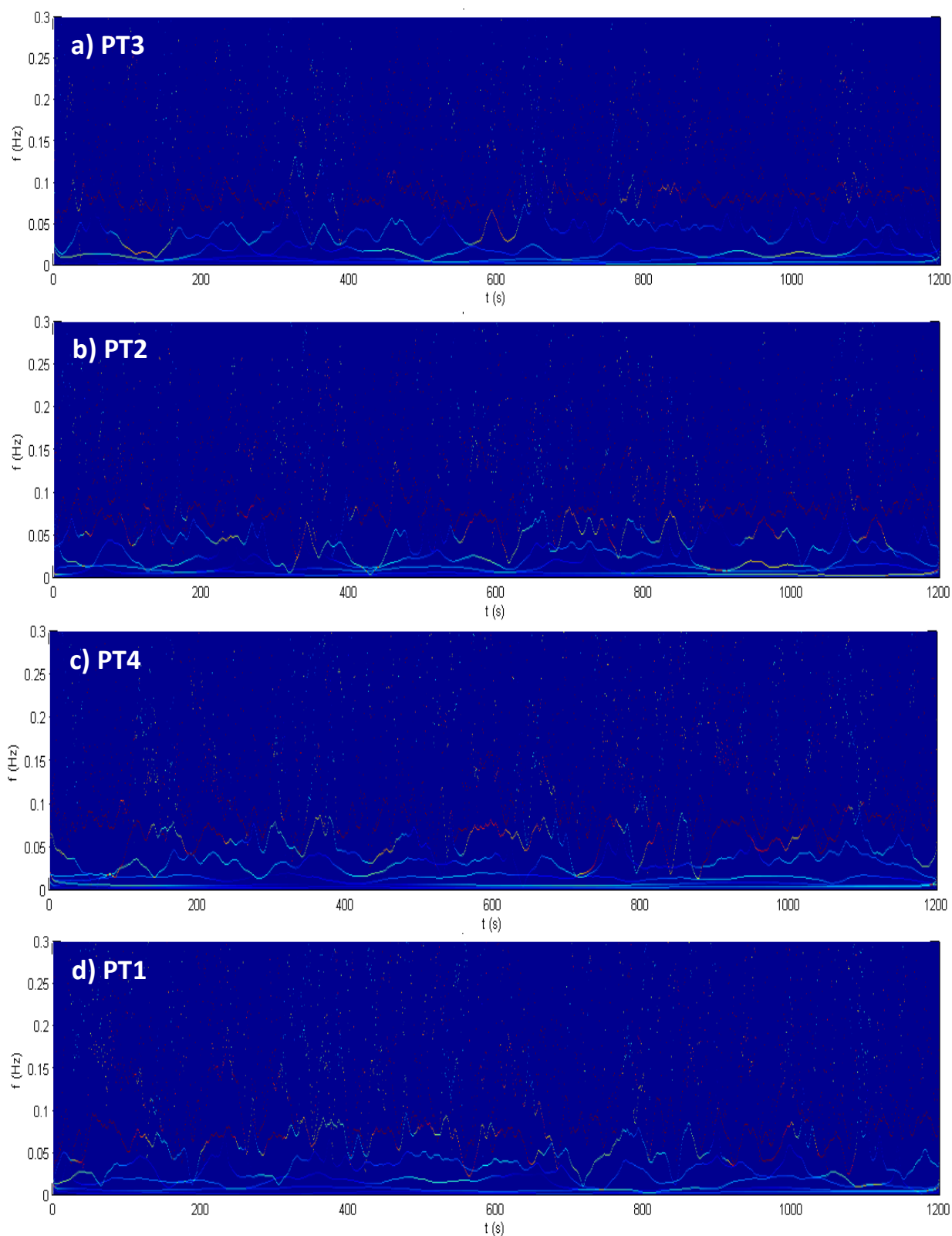


Figura 4.9 – Espectro de HHT para a) PT3 b) PT2 c) PT4 d) PT1 durante o Intervalo 1, na baixa-mar.

Analisando os espectros para outros intervalos de tempo, o tipo de resultados seria muito aproximado. Estes podem ser encontrados nos Anexo VII a Anexo XII, onde tem-se todos os Espectros de Ôndulas gerados, e nos Anexo XIII a Anexo XVIII, onde tem-se todos os Espectros de Hilbert gerados. Por exemplo,

para o Intervalo 5, correspondente a 2ª baixa-mar, nota-se a semelhança no comportamento das ondas comparativamente ao Intervalo 1. As ondas incidentes sobre os PT5 e PT6 também apresentam concentrações de energia em torno de 0.09Hz e a partir do PT7 até o PT1 aparece uma frequência secundária em aproximadamente 0.16Hz.

De notar que, durante a preia-mar, representada no Intervalo 3 exposto no Anexo IX, as ondas incidentes sobre os oito PT apresentam uma faixa de energia em torno de 0.09Hz, comportando-se, assim, como o PT5 que está ao largo. Como as profundidades em preia-mar possuem cerca de 3 metros de coluna d'água a mais que a baixa-mar, as ondas encontram-se mais afastadas do fundo, minimizando o atrito e interações com ele quando as ondas atingem os PT instalados mais próximos da praia (2, 3, 4 e 1). Este aumento de profundidade aparenta minimizar os efeitos observados anteriormente da zona de transformação. Portanto, as ondas ao largo comportam-se da forma quase similar às das ondas propagadas para a costa se há uma elevação do nível d'água tal que elimine os efeitos do atrito e de formas do fundo.

Outro aspecto relevante que se encontra na sequência do Intervalo 3 está na Figura 4.10 a). É possível verificar que a frequência diminui ligeiramente com o passar do tempo, traçando-se uma reta média a partir da concentração de energia do estante 0s (zero) até o instante 1200s e comparando-a com uma reta horizontal. Essa variação da frequência nesse intervalo de tempo, correspondente a um aumento gradual do período das ondas, é uma característica que não pode ser identificada por meio do Espectro de Fourier, pois, conforme exibido na Figura 4.10 b), este gráfico não inclui qualquer variação temporal.

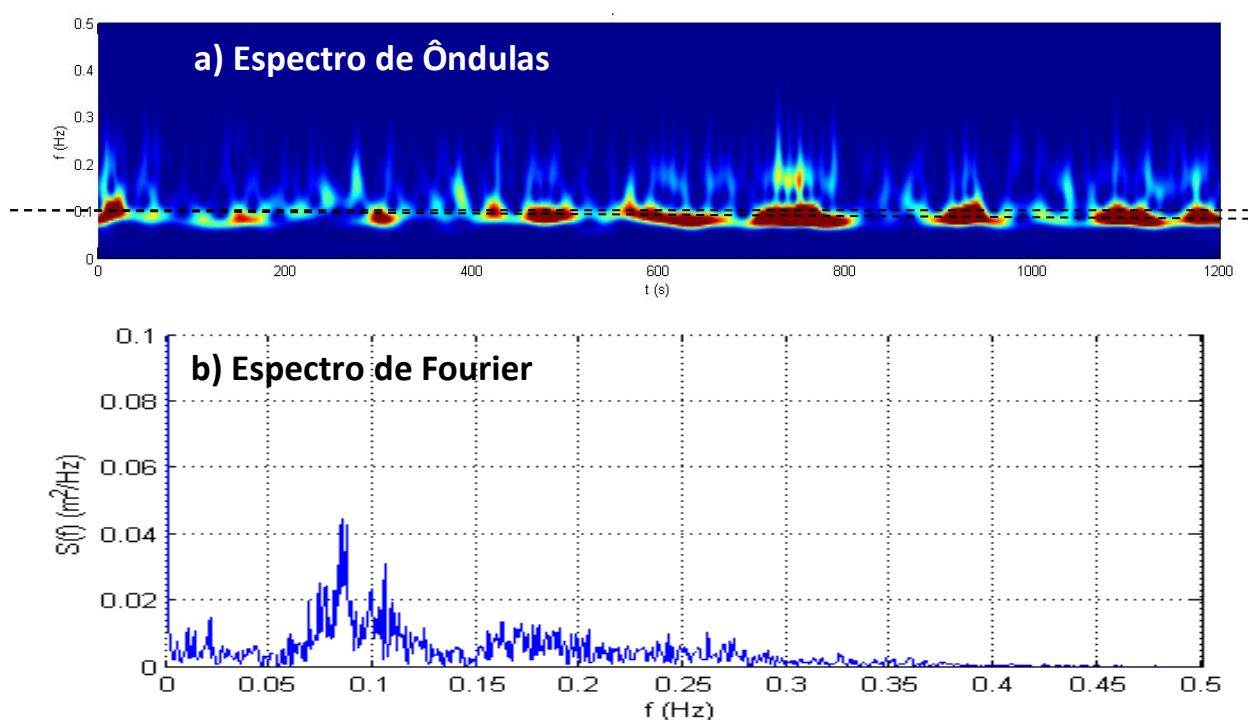


Figura 4.10 – Espectros de a) Ôndulas e b) Fourier para o PT8 durante o Intervalo 3, na preia-mar.

Utilizando a HHT para comparar o comportamento das ondas durante a preia-mar e a baixa-mar pode-se observar a Figura 4.11, onde tem-se os espectros de HTT para os PT5 e PT1 durante as duas marés.

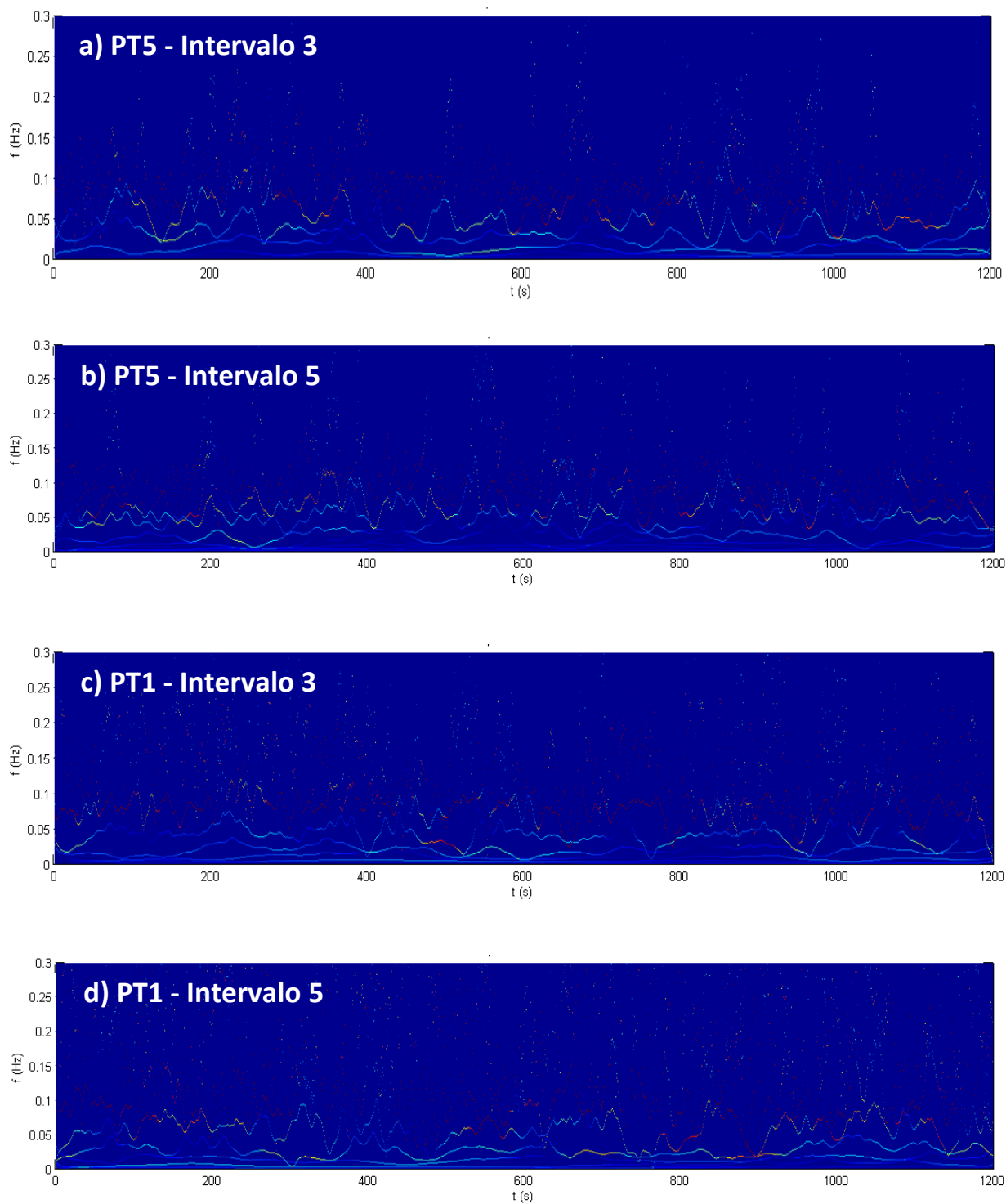


Figura 4.11 – Espectro de HTT para a preia-mar (a e c) e a 2ª baixa-mar (b e d).



Na Figura 4.11 pode-se notar que o comportamento das ondas difere entre uma maré e outra. A energia é mais acentuada entre 0,05 e 0,1Hz durante a preia-mar. Na 2ª baixa-mar, principalmente para o PT1, ocorre uma dissipação dessa energia para outras frequências, esta dissipação é notada pela maior amplitude e dissipação das curvas vermelhas de seu respectivo gráfico. O aumento da oscilação em torno de uma dada frequência aquando da diminuição de profundidade é espectável e sinónimo de que as não linearidades aumentam. De fato, uma onda linear (senoidal) manteria a energia numa frequência constante, ou seja, no gráfico seria representado por uma reta.

Na Figura 4.8 d) tem-se o Espectro do PT1 para a 1ª baixa-mar, que corrobora com esta afirmação por apresentar também maior amplitude de variação das frequências. A HHT serve aqui como complementar ao Espectro das Ôndulas que já se mostra eficiente para identificar esta mudança de comportamento em virtude das marés e o Espectro de Fourier (Figura 4.12), mesmo não identificando as variações no tempo, é capaz de confirmar a dissipação de energia que o PT1 obteve.

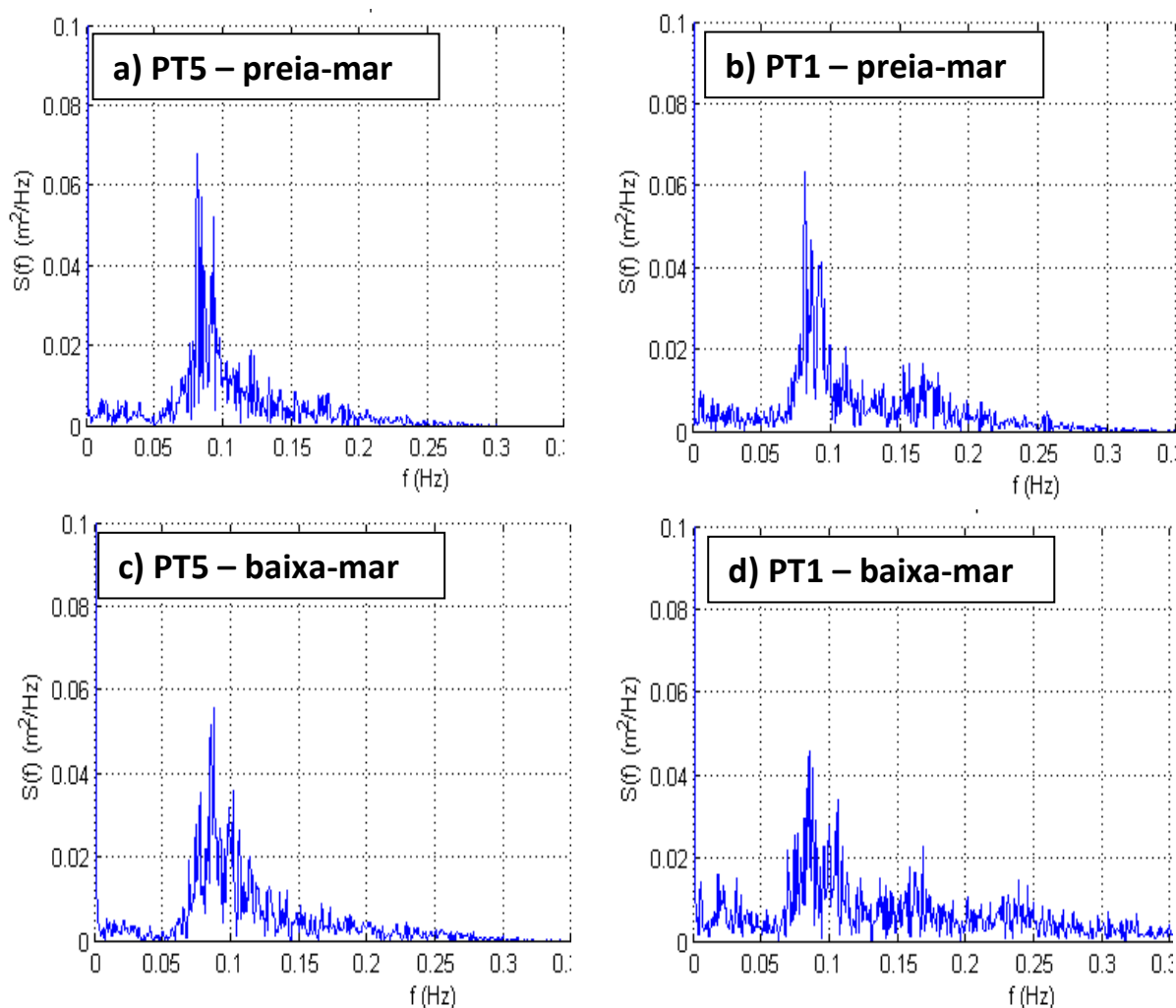


Figura 4.12 – Espectro de Fourier durante a preia-mar (a e b) e durante a baixa-mar (c e d).

Segue-se agora a análise elaborada para as marés intermediárias entre preia-mar e vazante.

Após a preia-mar ocorre a vazante, representada pelo Intervalo 4 que se encontra integralmente no Anexo X. Por se tratar de um período de transição entre as marés, espera-se que a vazante apresente espectros com características intermediárias entre a preia-mar e a baixa-mar. Quando analisamos o anexo citado, podemos observar que ocorre uma dissipação das frequências pouco significativa neste intervalo preservando ainda a concentração de energia em torno de 0.09Hz para os 8 PT, semelhante ao que ocorre com o Intervalo 2 (enchente) onde o comportamento característico da baixa-mar ainda predomina. Entretanto, isso não elimina o fato de que o Espectro de Ôndulas consegue representar alterações sutis entre ambos os intervalos, como é possível verificar a partir da Figura 4.13, que exhibe os Espectros de Ôndulas para os PT 5, 8 e 1 nos Intervalos 3 e 4. Nela, nota-se que no PT5 o comportamento das ondas permanece o mesmo, alterando a partir do PT8 quando o espectro começa a ficar um pouco mais claro no Intervalo 4, destacando o surgimento de uma frequência secundária nos últimos 100 segundos que se mantém em destaque até o PT1.



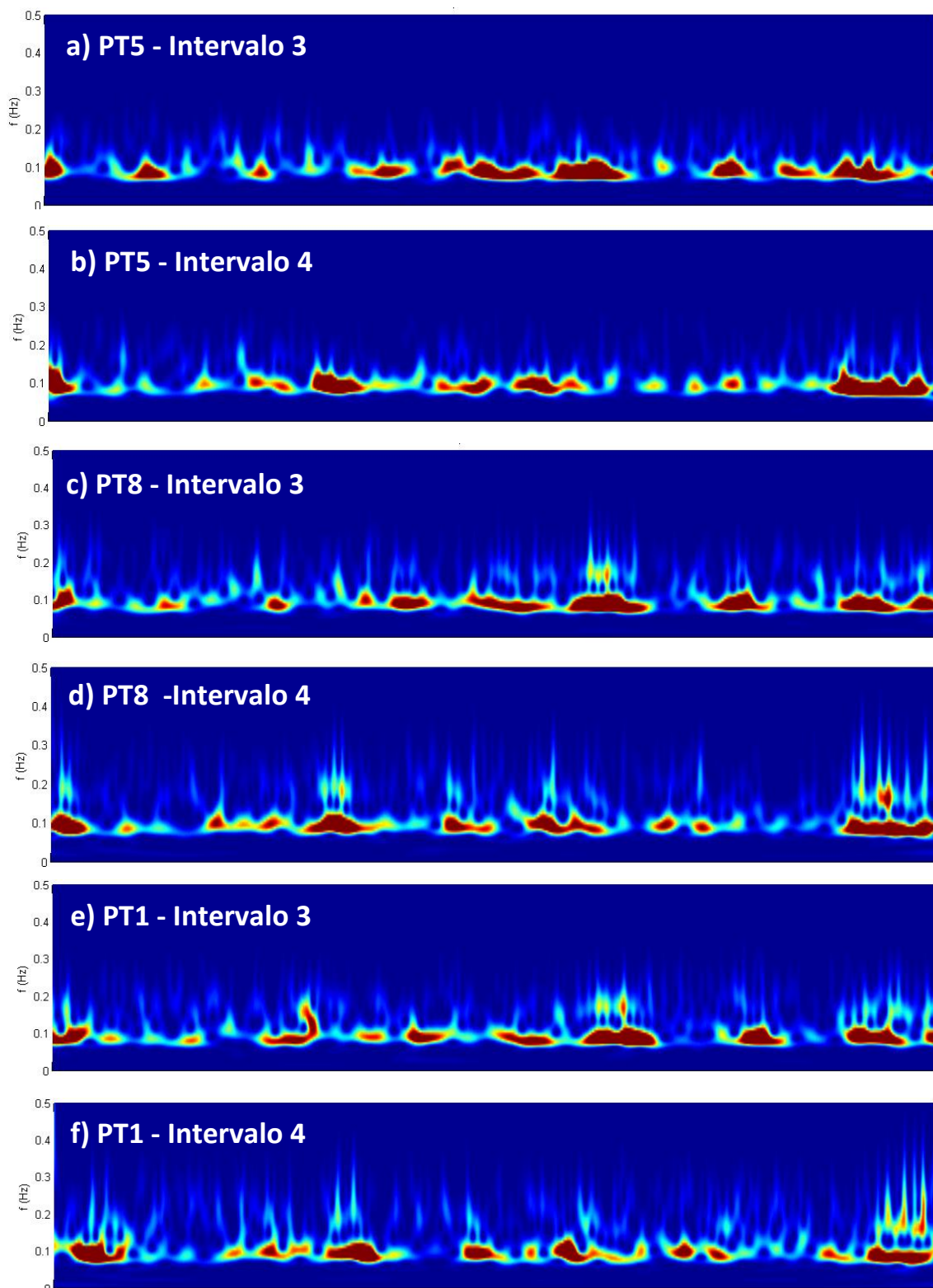


Figura 4.13 – Espectro de Ondulas para a) PT5 c) PT8 e) PT1 durante a preia-mar e b) PT5 d) PT8 f) PT1 durante a vazante.

A Figura 4.14 apresenta os Espectros de Ondulas dos dados obtidos pelo PT1 para a preia-mar (a) e para a vazante (b), sendo que as ondas no PT1 já apresentam certa dissipação de energia por estarem na região mais rasa dentro os PT e começar ali a interação com o fundo da região costeira antes das ondas incidentes nos demais. Aquando da vazante parece haver maior espalhamento da energia para frequências maiores o que indicia um comportamento de ondas assimétricas mais acentuado causado pela diminuição de profundidade nesse local.

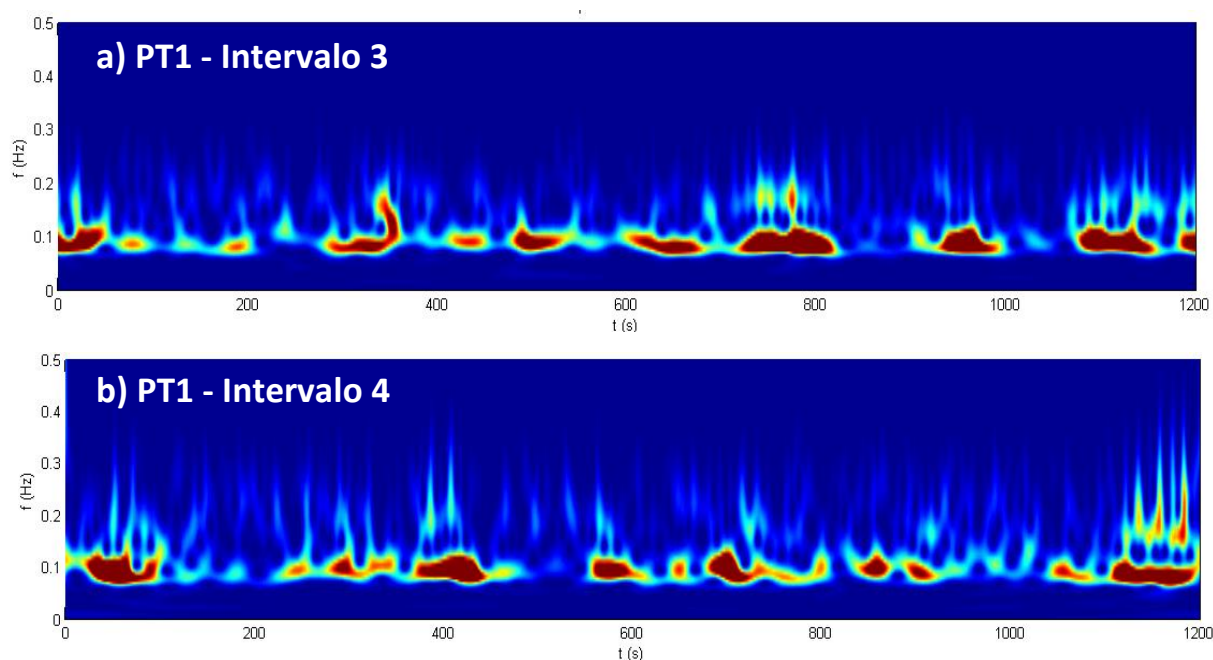


Figura 4.14 – Espectro de Ondulas para o PT1 durante a a) preia-mar e b) vazante.

Durante a segunda enchente, Intervalo 6, o resultado é contrário ao apresentado durante a vazante, mas o princípio se mantém, isto é, as assimetrias são mais notórias aquando da diminuição de profundidade. Como se verifica no Anexo VIII durante a enchente, as ondas assumem características intermediárias às duas marés adjacentes com comportamento predominante da maré que a antecede, neste caso, a baixa-mar (Intervalo 5).

A Figura 4.15 apresenta os Espectros de Ondulas para os dados obtidos pelo PT1 durante os intervalos 5 (a) e 6 (b). Nota-se, novamente, que as ondas em águas rasas começam a expressar as mudanças associadas às transformações das ondas propagadas, havendo um espalhamento de energia para frequências maiores. Por exemplo, através da Figura 4.16 para os dados obtidos pelo PT5 durante todos os intervalos, observa-se que as ondas em águas mais profundas apresentam um comportamento mais constante, i.e., mais linear, independente das mudanças de maré e consequentes alterações de profundidade.

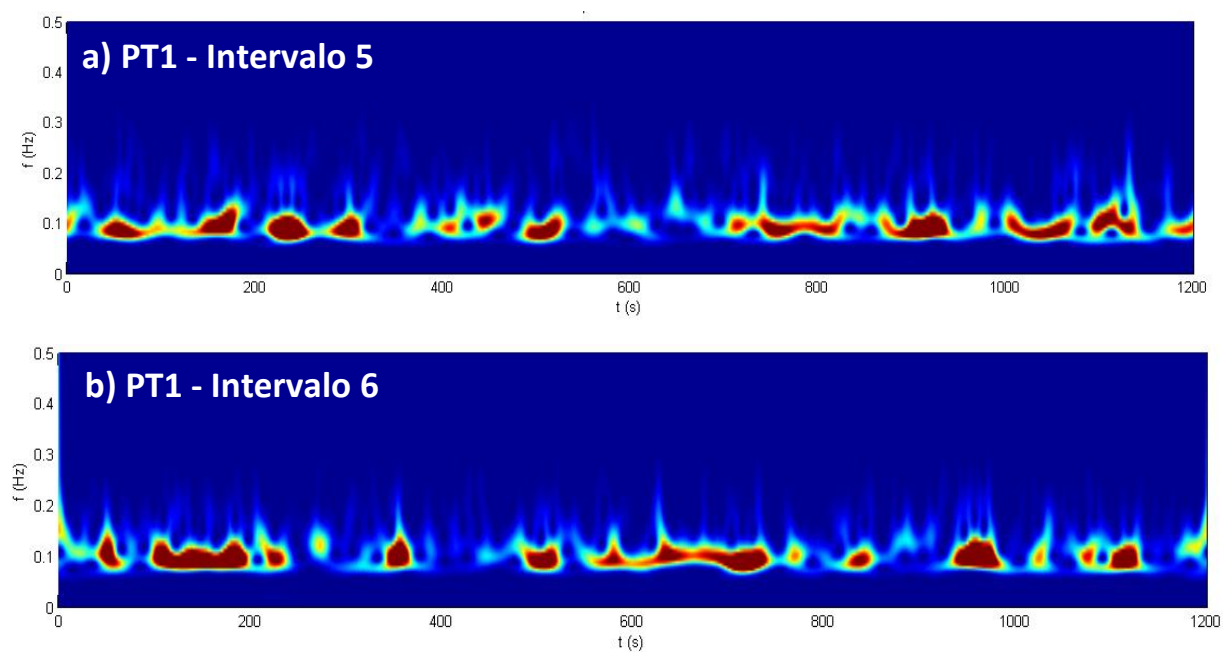


Figura 4.15 – Espectro de Ondulas para o PT1 durante a) baixa-mar e b) enchente

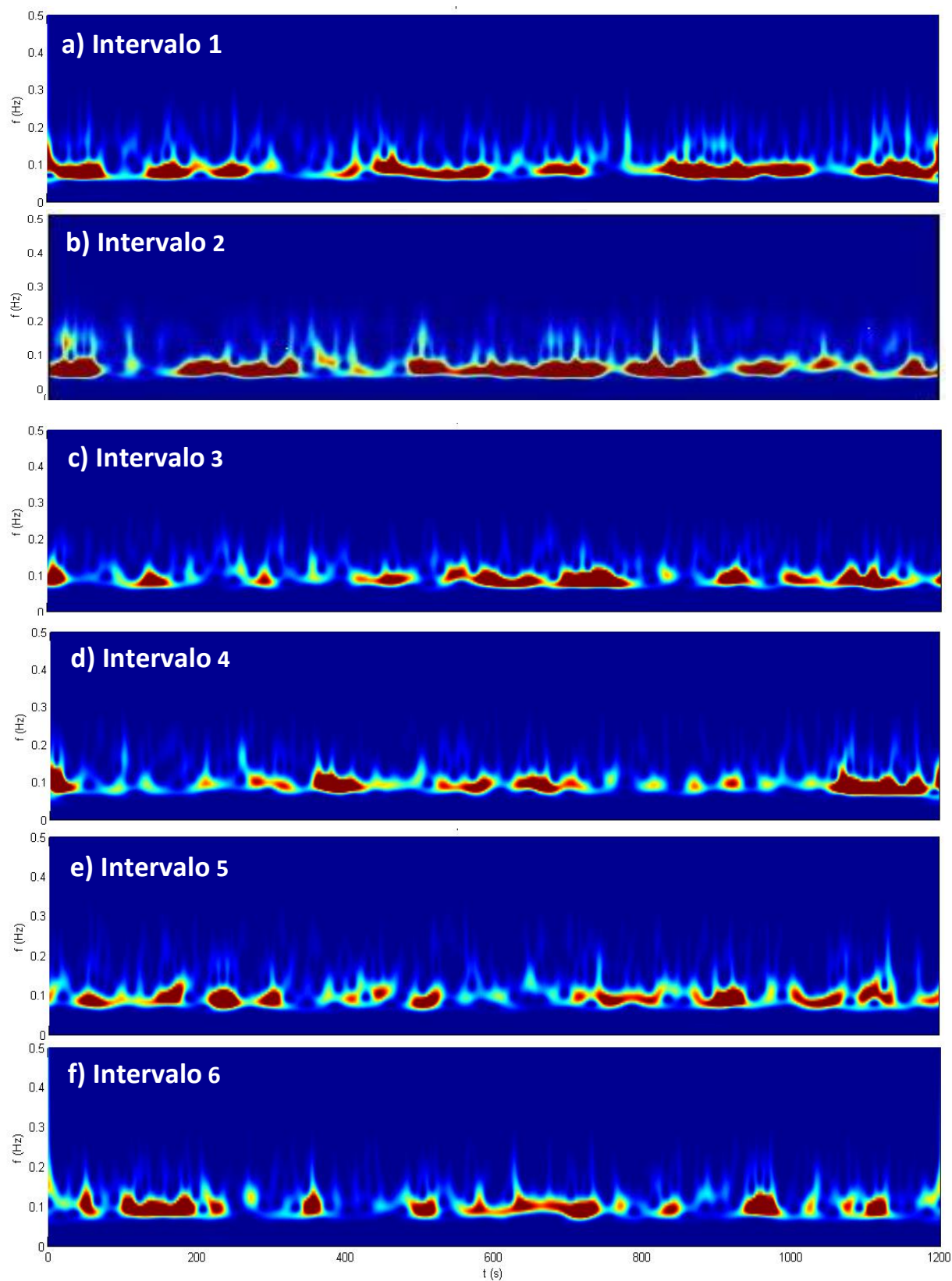


Figura 4.16 – Espectros de Ôndulas para o PT5 durante os intervalos a) 1, b) 2, c) 3, d) 4 e) 5 e f) 6.

## 4.2 ANÁLISE DAS ASSIMETRIAS (COM DADOS FILTRADOS)

Este capítulo corresponde a análise das assimetrias realizada com a metodologia proposta por Abreu *et al.* (2010) e por Abreu *et al.* (2011).

Os dados de pressões, adquiridos com uma frequência de 2Hz, receberam tratamento prévio para que as ondas de longo período fossem removidas uma vez que o objetivo desta secção é caracterizar as assimetrias associadas ao movimento orbital. Assim, foram utilizados dois filtros diferentes do Matlab para separação da componente da elevação da superfície livre em altas frequências (etaH) e baixa frequências (etaL). O interesse está em analisar o sinal das altas frequências através de uma análise onda a onda, através da separação das ondas pelos valores de período de zero ascendente.

A Figura 4.17 ilustra parte do código do Matlab evidenciando os filtros aplicados, nomeadamente os filtros *Filtfilt* e *Butterworth*, bem como as frequências de corte e parâmetros específicos adotados neste trabalho.

```
%% Filter %% --> frequência de corte fc
fc=0.03;
lw=length(eta);
nn=20; mm=5;
Wn=fc/freq*2;
[a,b]=maxflat(nn,mm,Wn);
etaL=filtfilt(a,b,eta);
etaH=eta-etaL;

% Filtro Butterworth
fa=length(eta);
fc=2500; [B,A]=butter(2,fc/fa,'high'); f_filt=filter(B,A,eta)
```

Figura 4.17 – Filtros *Filtfilt* e *Butterworth* utilizados para obtenção da componente da elevação da superfície livre em altas frequências.

Embora o propósito dos filtros seja idêntico, *i.e.*, obtenção do sinal das altas frequências, a formulação matemática subjacente é distinta e, conseqüentemente, as respostas são ligeiramente diferentes. A Figura 4.18 ilustra, para o PT3, as pequenas diferenças da elevação da superfície livre em altas frequências obtidas para os filtros *Filtfilt* (etaH\_1) e *Butterworth* (etaH\_2). Há, portanto, interesse em avaliar se a escolha de um filtro interfere no processamento do sinal de altas frequências subsequente e se influencia os resultados dos parâmetros associados à assimetria das ondas.

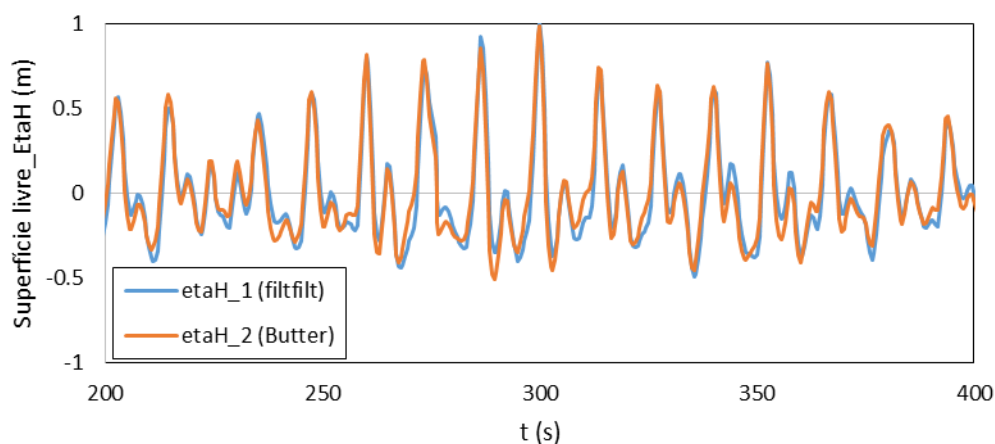


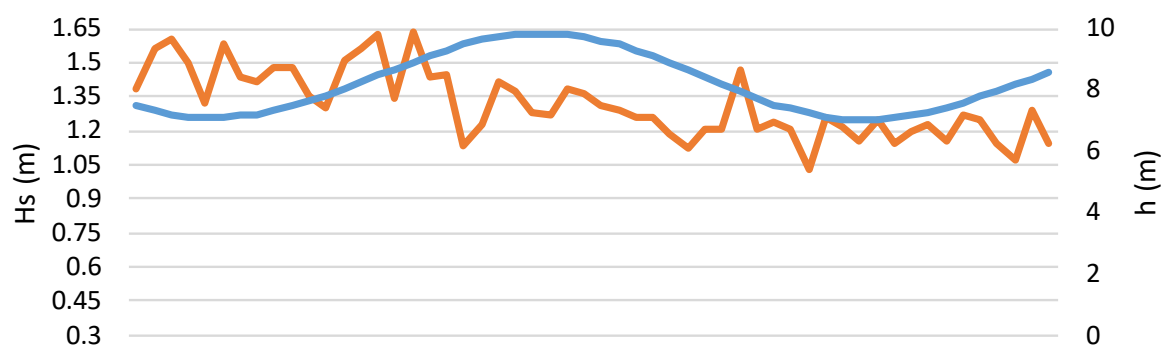
Figura 4.18 – Comparativo de filtros aplicado ao gráfico de superfície livre do PT3.

Para cada PT foram gerados os gráficos médios dos coeficientes de assimetria  $R$  e  $\alpha$ , convertendo-se, posteriormente, nos índices assimétricos ( $r$ ) e parâmetros de forma ( $\phi$ ) expostos na secção 2.4.

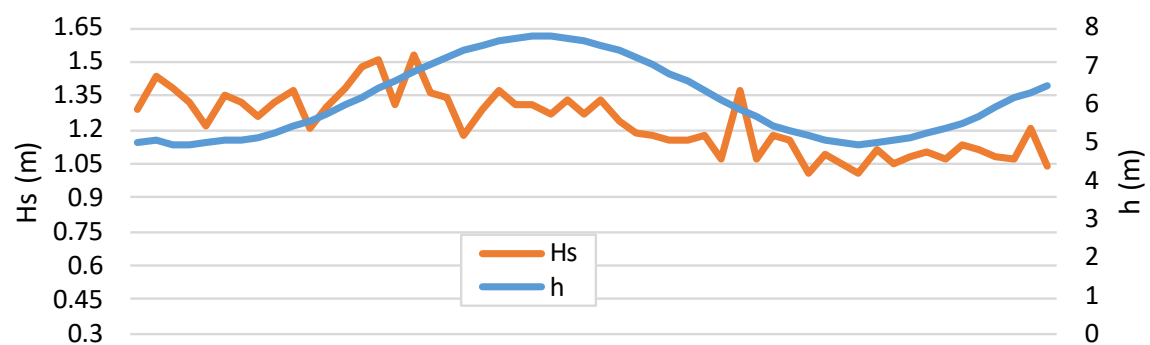
Antes de ser efetuada a análise dos coeficientes de assimetria, da análise onda a onda, calcularam-se os valores da Altura Significativa ( $H_s$ ) e do Período de Pico ( $T_p$ ) a partir dos dados dos PT. Os resultados para os PT1, PT5 e PT8 encontram-se expostos na Figura 4.19 e na Figura 4.20, respectivamente. Escolheram-se estes para exemplificar pois correspondem a um PT mais próximo da costa (PT1), mais afastado da costa (PT5) e a um intermédio (PT8). Os demais resultados dos outros PT encontram-se em Anexo XIX e Anexo XX.

Os valores obtidos são coerentes com as informações apresentadas pelo Instituto Hidrográfico para a Boia de Leixões no mesmo período apresentadas anteriormente na Tabela 3.5. Verifica-se que a  $H_s$  é de cerca de 1.1m para os PT7, 3, 2, 4 e 1 (mais próximos da costa) e de 1.3m para os PT5 e 8 (mais afastados da costa), apresentando uma queda de aproximadamente 0.2 a partir da preia-mar, estes valores médios estão próximos da média de 1.5m apresentada na Tabela 3.5. A redução dos valores de  $H_s$  à medida que as ondas se propagam para a costa são espectáveis, atendendo à dissipação de energia e aos processos de transformação que as ondas experienciam. Em relação a  $T_p$ , nota-se que os valores são coerentes com a mesma tabela, estando em torno de 12s, denotando uma ligeira redução para 11s com o decurso da campanha de campo.

## a) PT5



## b) PT8



## c) PT1

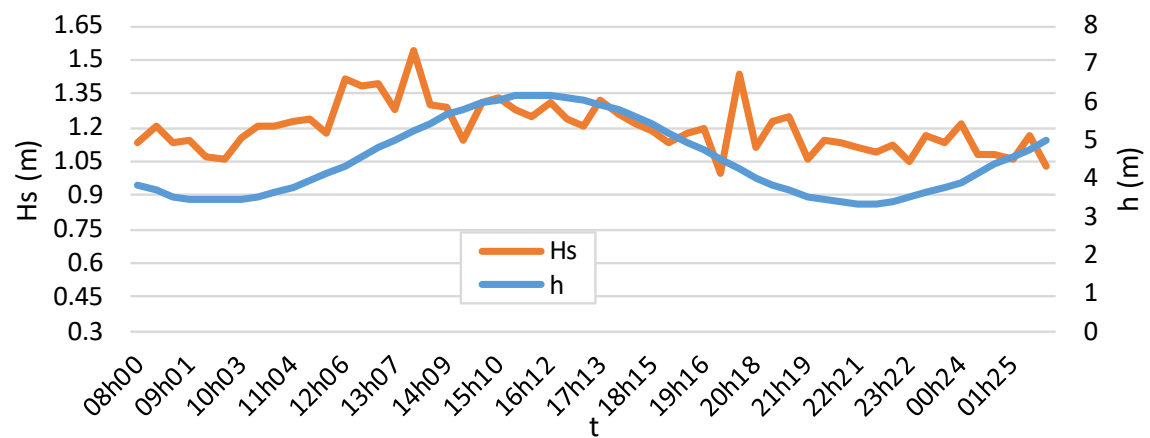
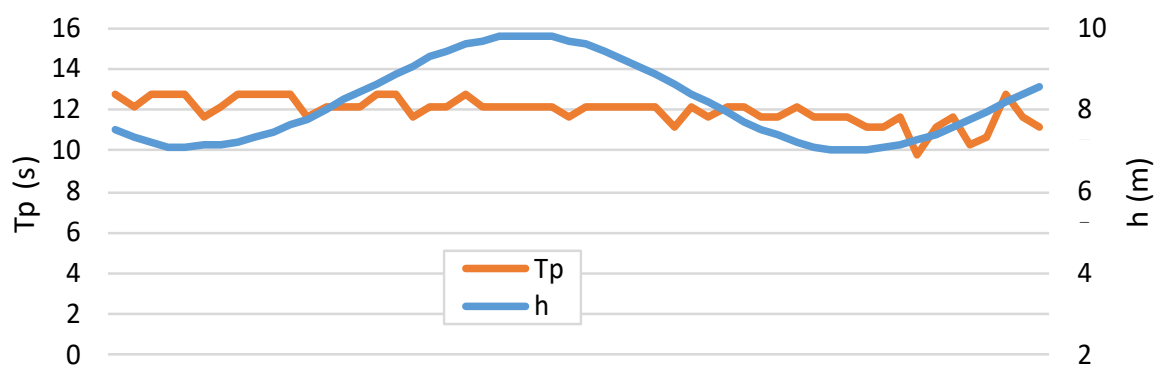


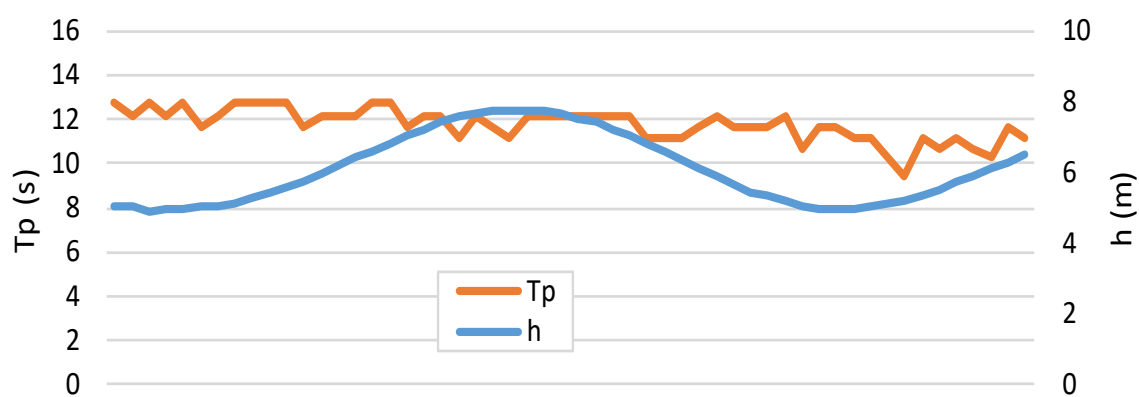
Figura 4.19 – Altura Significativa ( $H_s$ ) em metros para os PT 5, 8 e 1 versus profundidade ( $h$ ).



a) PT5



b) PT8



c) PT1

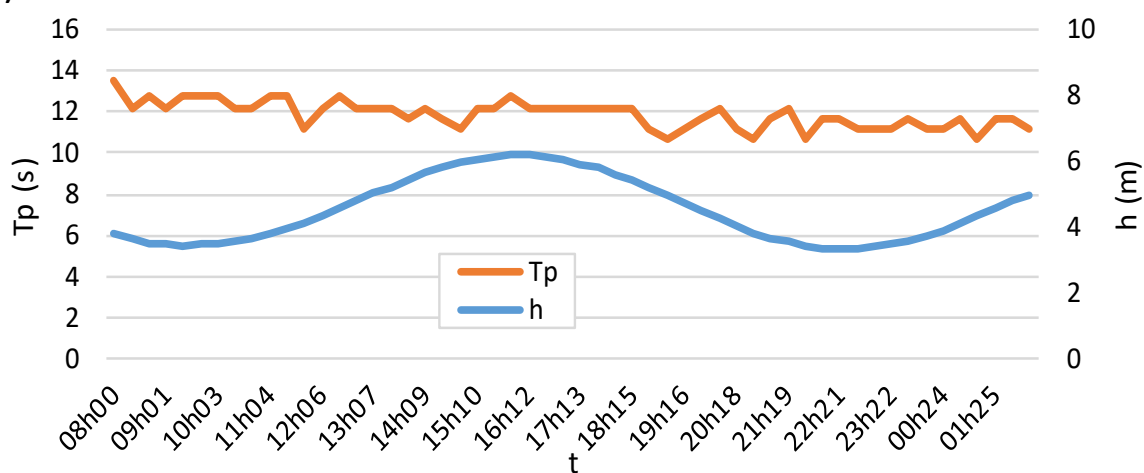


Figura 4.20 – Período de Pico ( $T_p$ ) em segundos para os PT 5, 8 e 1 versus profundidade ( $h$ ).

A Figura 4.21 apresenta a variação espacial dos valores médios de  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\phi$ , onde a sequência obedece a localização dos PT em sentido perpendicular à costa, iniciando com o PT5, ao largo, e terminando com o PT1, que está mais próximo da linha de costa.



A Figura 4.21, ainda, apresenta os resultados da aplicação do filtro *Filtfilt* (etaH\_1) em marcadores quadrados e do filtro *Butterworth* (etaH\_2) em marcadores losangulares. Observa-se que os dados apresentam um comportamento sincrônico para ambos os filtros aplicados em todos os parâmetros gerados, nota-se apenas que o filtro *Butterworth* tende a oferecer dados de maior magnitude em relação as assimetrias.

Os parâmetros  $R$  e  $\alpha$  são simétricos quando seu valor é 0.5 e ondas com assimetrias mais intensas apresentam valores mais distantes de 0.5, nota-se que no gráfico de  $R$  os valores são superiores a 0.5 caracterizando ondas de Stokes que apresentam maiores valores na crista, comparativamente à cava.

De acordo com Elfrik *et al.* (2006, citado por ABREU *et al.*, 2010) em seu estudo o alcance dos parâmetros não lineares estavam dentro de  $0.51 < R < 0,66$  e  $0.22 < \alpha < 0.54$ , as médias dos parâmetros  $R$  e  $\alpha$  presentes na Figura 4.21, para todo o período da campanha, estão entre aproximadamente 0.52 e 0.69 para  $R$  e 0.45 e 0.55 para  $\alpha$ , corroborando com as afirmações destes autores.

Conforme exposto na secção 2.4, os parâmetros  $r$  e  $\phi$  são um bom complemento para a análise das não linearidades pois oferecem boas interpretações da forma das ondas quando analisados em conjunto e, de acordo com Abreu *et al.* (2011), 0 (zero) é o valor que representa as ondas lineares para o parâmetro  $r$ . Um aumento em módulo dos valores de  $r$  demonstra crescimento das assimetrias da onda. Pode-se observar que as médias de  $r$  estão entre 0.17 e 0.4, em torno do 0.3 apresentado como exemplo na Figura 2.10. Nota-se sobretudo que é sobre a posição do PT8 que as não linearidades aparentam ser mais significativas. O mesmo ocorre para o parâmetro  $\phi$  o que significa que, durante o período da campanha, nesse local parece ser havido arrebenção de ondas, pois é uma posição onde as assimetrias parecem mais acentuadas. Nota-se que o formato destas ondas, com  $\phi$  a variar entre  $-1.6 (\cong -\pi/2)$  e  $-2.5 (\cong -4\pi/5)$ , ainda são valores significativamente afastados de zero associados a ondas em dentes de serra. Não obstante, é nessa posição que se obtém as maiores acelerações, atendendo ao valor mais baixo de  $\phi$ . Estes resultados parecem indiciar a existência de uma barra litoral submersa na zona do PT8.

De notar que nos PT 6, 7 e 8 há uma variação em todos os padrões,  $R$  aumenta, enquanto  $\alpha$  diminui ( $R > 0.5$  e  $\alpha < 0.5$ ) acentuando as assimetrias das ondas. Os próximos três PT3, 2 e 4 possuem ondas de comportamento semelhante até atingir o PT1 na zona de arrebenção que apresenta os maiores valores em módulo para todos os parâmetros, situação esperada uma vez que este comportamento é comum em águas rasas. Desta forma, os dados aparentam mostrar que, no período da campanha, pode ter havido uma primeira arrebenção na zona do PT8 e que volta haver uma reformulação das ondas para uma segunda arrebenção à medida que nos aproximamos do PT1.

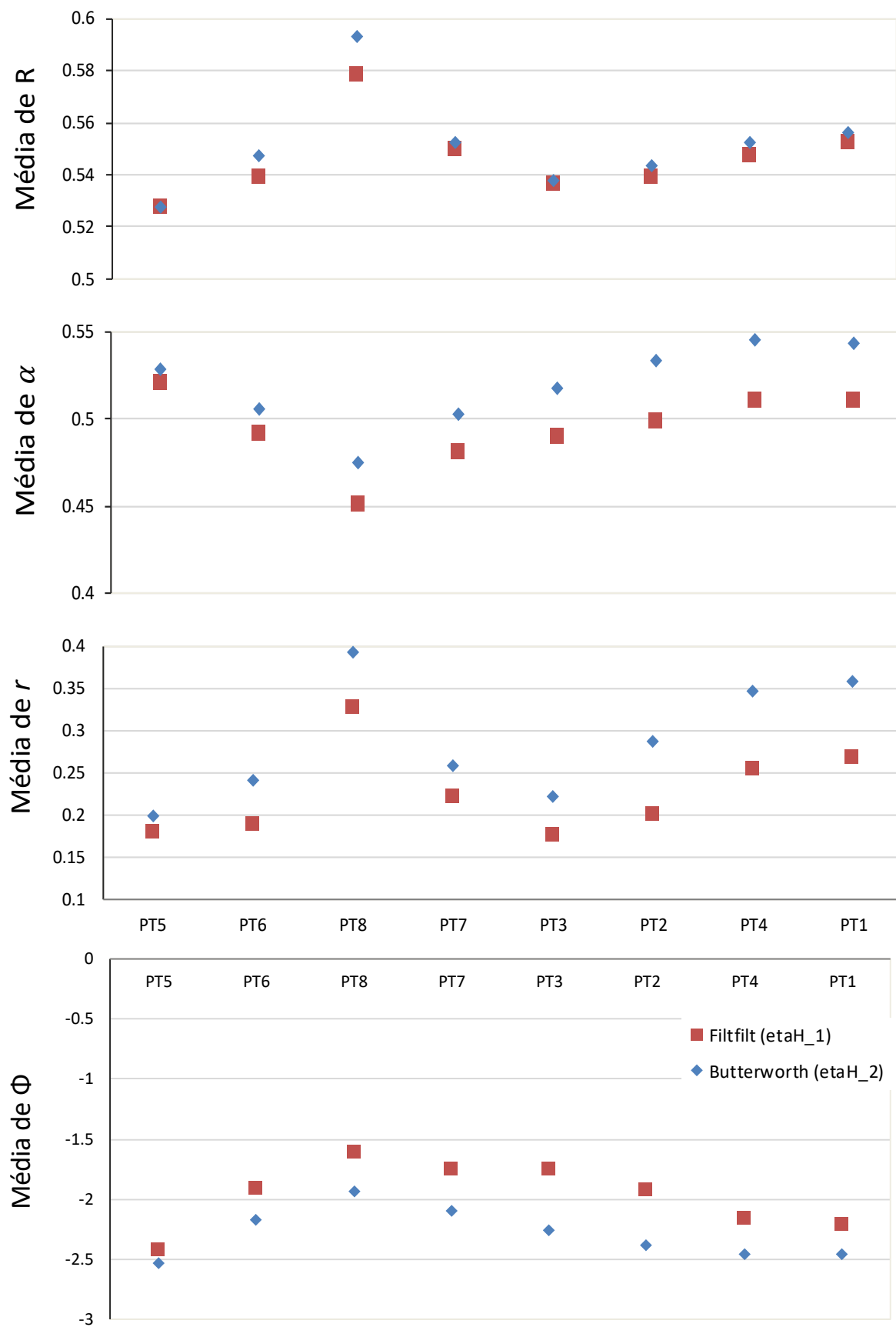


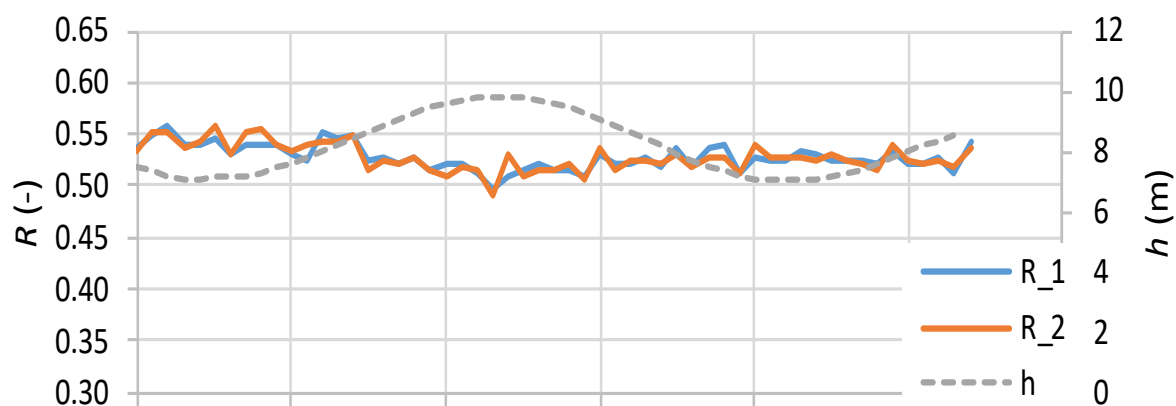
Figura 4.21 – Média dos parâmetros  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\phi$  para os PT analisados.

Além da análise anterior foram determinados os gráficos da variação temporal dos parâmetros  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\phi$  para cada PT sob a aplicação dos dois filtros citados no início deste capítulo, o filtro 1, *Filtfilt*, está representado em linha azul e o filtro 2, *Butterworth*, está representado em linha laranja. O tempo foi dividido em 54 intervalos de 20 minutos e é representado no eixo das abcissas pela letra  $t$ , enquanto os parâmetros analisados encontram-se no eixo das ordenadas. Com a finalidade de comparar o comportamento destes parâmetros durante a variação das marés os gráficos também possuem uma linha que representa a variação da profundidade da água,  $h$ , durante o tempo. Segue-se a discussão de cada um destes parâmetros com seus respectivos gráficos em função do tempo para os PT 5, 8 e 1, por apresentarem comportamentos distintos entre si e representativos dos PT adjacentes a cada um. Os demais PT têm seus gráficos inseridos nos Anexos deste documento.

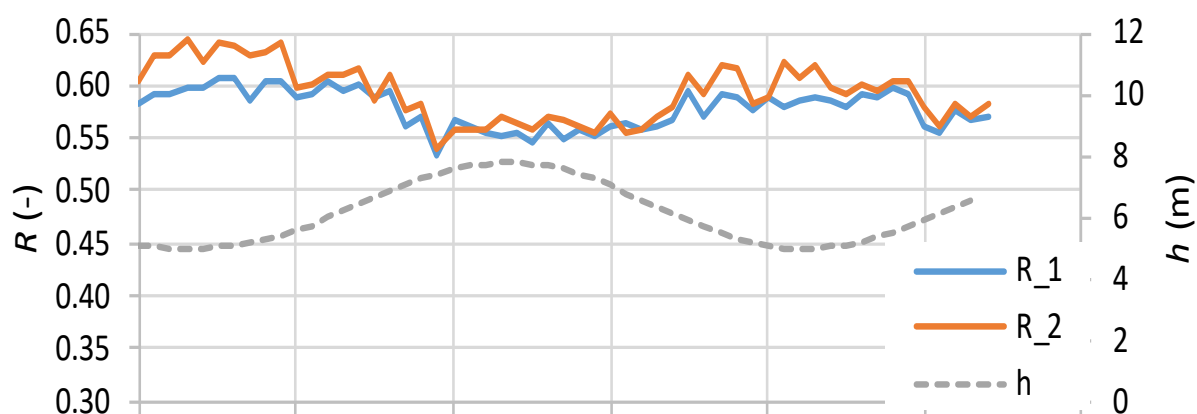
A Figura 4.22 retrata a variação de  $R$  em relação aos intervalos de tempo referidos para os PT 5, 8 e 1, observa-se que apresenta valores de  $R$  em torno de 0.54 durante a baixa-mar e aproxima-se de 0.5 durante a preia-mar. Os PT ao largo (exemplo PT5 da Figura 4.22) apresentam valores característicos de ondas lineares (com  $R$  aproximadamente igual a 0.5) durante a preia-mar porque como a altura da água é maior, a interação com o fundo diminui, minimizando sua influência sobre o comportamento das ondas.

Continuando as observações sobre a mesma figura, nota-se que o PT8 apresenta uma variação maior de  $R$  entre 0.55 e 0.65, a qual os valores mais próximos de 0.55 ocorrem somente para a preia-mar. Conforme se aproximam da costa, as ondas voltam a atuar em torno de  $R = 0.55$  sem sofrer variações com a mudança das marés, como podemos notar no terceiro gráfico da Figura 4.22 correspondente ao PT1. Estes resultados corroboram os das figuras anteriores, sendo sobre o PT8 que as assimetrias de  $R$  mais se pronunciam e, sempre, para os períodos em que a profundidade é menor. Aí, é provável que tenha ocorrido arrebentação e que a reformulação das ondas denote que o PT1 possua ondas com características ligeiramente mais lineares que o PT8.

## a) PT5



## b) PT8



## c) PT1

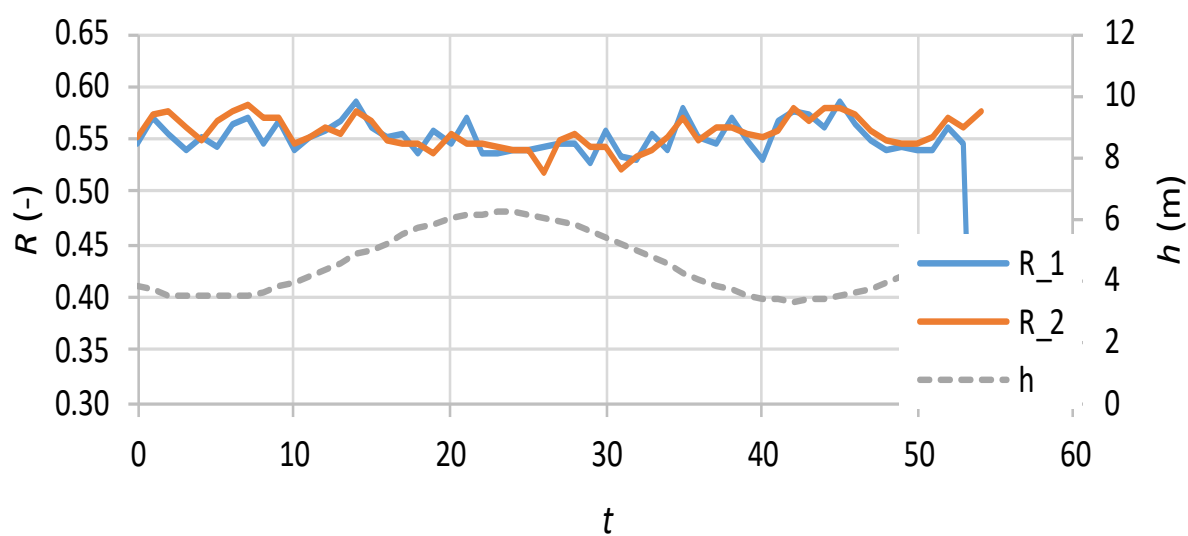


Figura 4.22 – Coeficiente de Assimetria das Velocidades ( $R$ ) por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8 e c) 1.

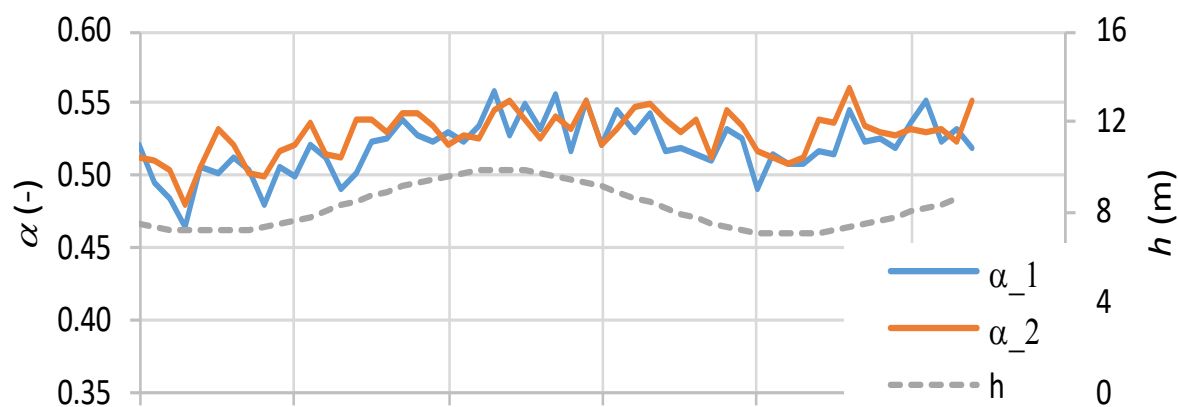
Os outros parâmetros também apresentam variações conforme a ocorrência das marés. Verifica-se este comportamento para  $\alpha$  na Figura 4.23 cujos PT ao largo, PT5 e PT8, apresentam diminuição nos valores de  $\alpha$  quando ocorre a baixa-mar. Ressaltando que quando  $\alpha$  se aproxima de zero a onda assume características assimétricas e que quando  $\alpha = 0.5$  acontece o oposto, conclui-se que a redução do parâmetro  $\alpha$  de 0.55 para 0.45 indica que as ondas incidentes tendem a ficar assimétricas em relação as acelerações (típico de ondas em dentes de serra).

Em particular, o PT8 (segundo gráfico da Figura 4.23) apresenta predominância de  $\alpha$  entre 0.4 e 0.45 durante a baixa-mar e aproxima-se de 0.5 durante a preia-mar, reforçando a constatação feita na análise de  $R$  de que as ondas no PT8 assumem comportamento tipicamente não-linear durante a baixa-mar.

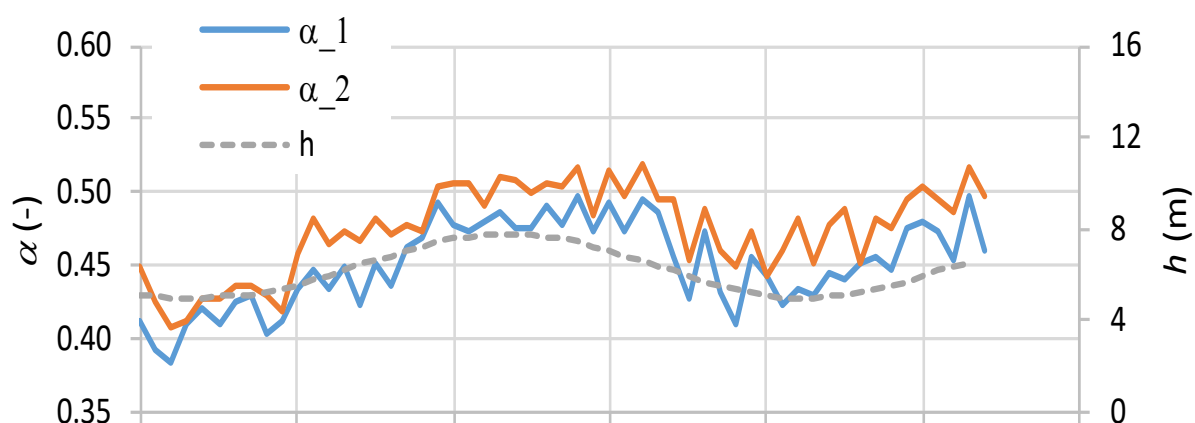
Os valores de  $\alpha$  do PT1 (painel do fundo da Figura 4.23) variam em torno de 0.5 com os dados gerados pelo filtro *Filtfilt*, linha azul, enquanto estão em 0.54 com a aplicação do do filtro *Butterworth*, linha laranja. É a primeira vez neste texto que um filtro apresenta um resultado significativamente diferente do outro para o objetivo de análise estabelecido. Ainda que com um comportamento sincrônico, de facto, para este parâmetro  $\alpha$ , o filtro 2 (*Butterworth*) fornece valores constantemente superiores aos do filtro 1 (*Filtfilt*). Para o filtro 1 pode-se dizer que as ondas incidentes sobre o PT1 são simétricas em relação a  $\alpha$ . Os valores fornecidos com o filtro 2 aparentam ser maiores àquilo que, habitualmente, se encontra na bibliografia. Para ambos os filtros observa-se que não ocorre grande influência da maré sobre  $\alpha$  no que respeita ao PT1.

Em relação ao parâmetro  $r$  tem-se a Figura 4.24. Iniciando pela análise do PT5, nota-se que em toda a experiência  $r$  mantém-se próximo de 0.18, ocorrendo uma queda de valor pouco acentuada durante a preia-mar. Os valores do PT1 também são sensivelmente constantes ao longo do tempo situando-se em torno de 0.3. Já os valores apresentado pelo PT8 apresentam uma variação significativa ao longo do tempo. Enquanto para a baixa-mar o valor de  $r$  atinge maiores valores (cerca de 0.4 a 0.5), para a preia-mar ( $t = 25$ ) o valor cai bruscamente (cerca de 0.2 a 0.3).

a) PT5



b) PT8



c) PT1

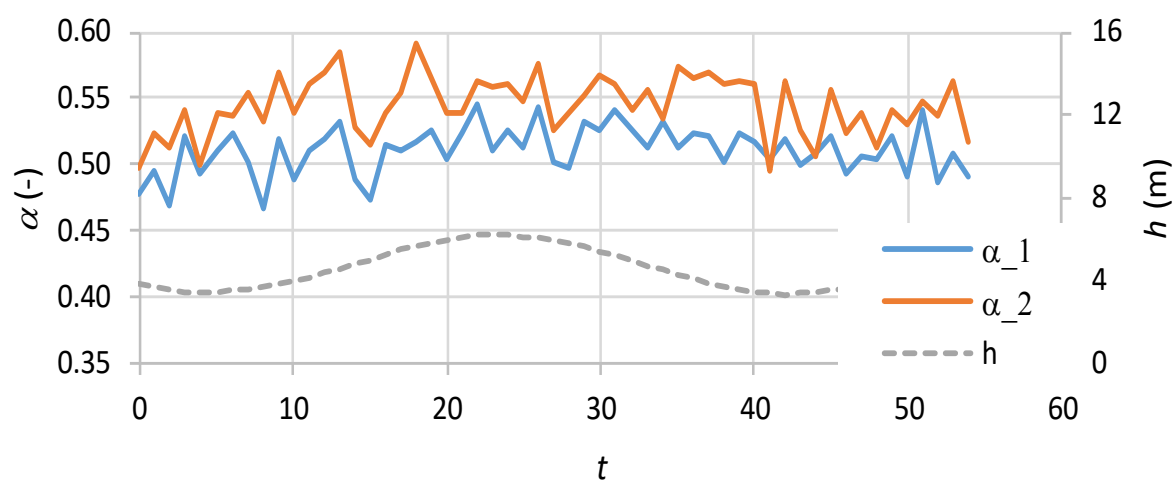


Figura 4.23 – Parâmetro  $\alpha$  por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8 e c) 1.

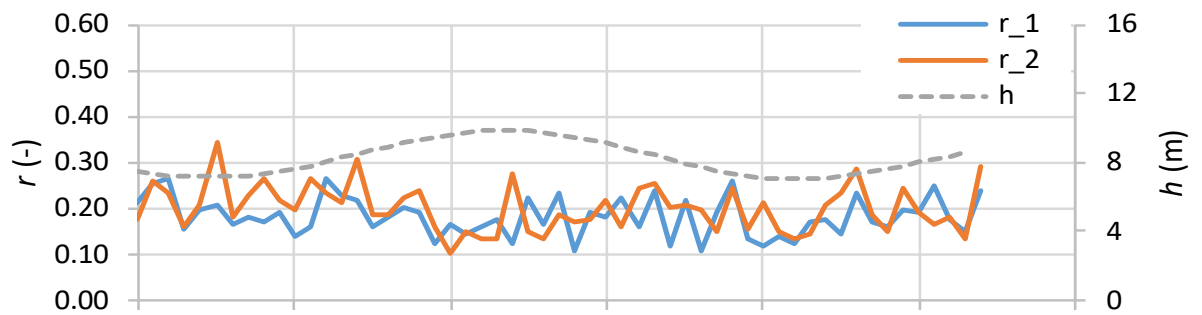
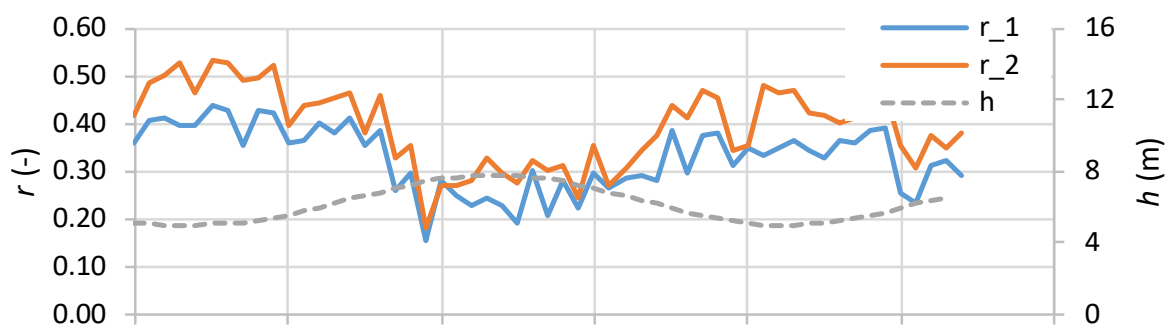
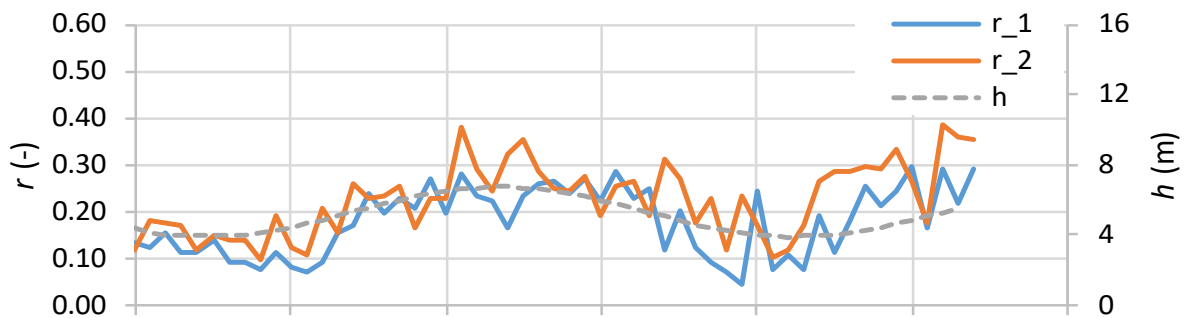
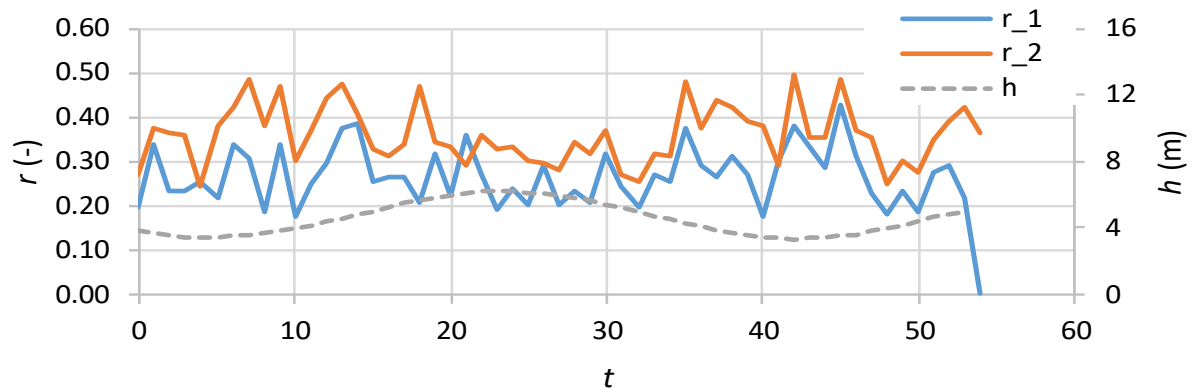
**exo I PT5****exo II PT8****exo III PT3****exo IV PT1**

Figura 4.24 – Índice Assimétrico ( $r$ ) por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8, c) 3 e d) 1.

Segundo Ruessink *et al.* (2009, citado por ABREU *et al.*, 2011):

“[...] uma redução (em módulo) do valor de  $r$  faz diminuir as não linearidades. No caso particular de  $r = 0$  a onda converte-se numa onda sinusoidal como na Teoria Linear de ondas. Contudo, note-se que esta forma é pouco representativa de ondas em águas pouco profundas onde, geralmente coexistem assimetrias de velocidades e acelerações.”

Observa-se através dos gráficos da Figura 4.24 que a maioria dos dados analisados representam ondas assimétricas concordando com as afirmações feitas por Ruessink *et al.*, em 2009. Em particular, é sobre o PT8 que se observam as maiores assimetrias aquando da diminuição de profundidade associado às baixa-mares.

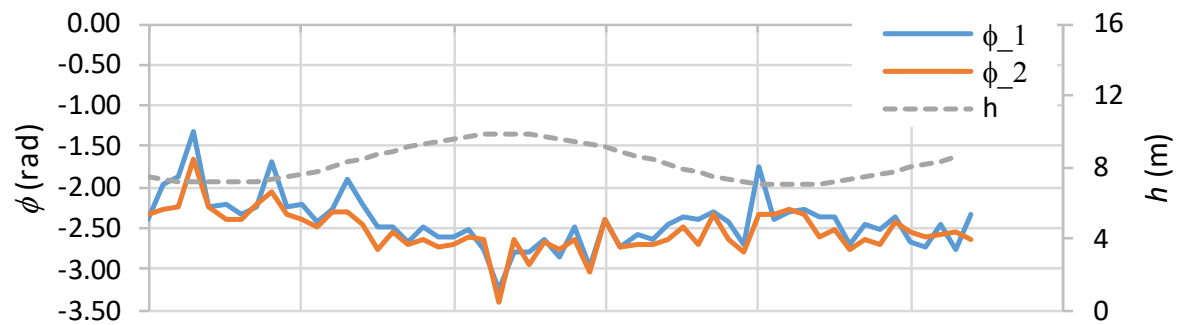
Por fim, o parâmetro de forma,  $\phi$ , que descreve a forma do perfil de onda é analisado pela Figura 4.25.

Verifica-se que com os dados dos oito PT o resultado foi sempre assimétrico, mas este parâmetro apresentando ligeiras oscilações entre  $-\pi/2$  ( $\cong -1.6$ ) e  $-\pi$  ( $\cong -3.14$ ) em módulo. Os valores mais altos, em módulo, aparecem no PT5 que tem esse efeito acentuado durante a preia-mar. Os valores mais baixos, em módulo, ocorrem para as baixa-mares do PT8 onde, o valor de  $-\pi/2$  está associado à aproximação de forma de ondas em dente de serra típicas da zona de arrebentação. Esta variação do valor do parâmetro de forma,  $\phi$ , ao longo do tempo pode ser observada também no Anexo XXIV onde tem-se toda a sequência para os diversos PT.

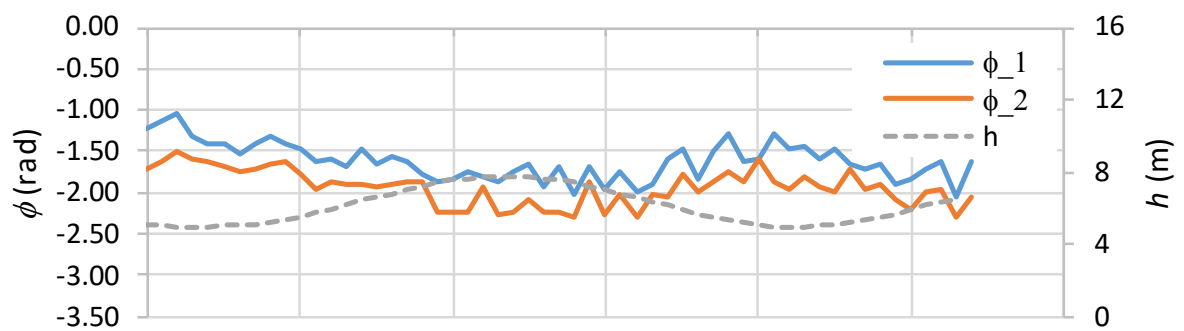
De forma geral, os gráficos analisados nesta secção comprovam por meio dos 4 parâmetros que características assimétricas estão presentes em ondas geradas por vento e tem relação com a variação da profundidade da água pela qual as ondas viajam, ocorrendo em maior magnitude em regiões de águas rasas, que são foco das obras de intervenção costeira, principalmente quando ocorrem transformações nas praias devido ao transporte de sedimentos. Os espectros apresentados na secção anterior já haviam comprovado a existência das não linearidades e não estacionariedades. Entretanto, a análise por parâmetros, além de ser complementar, demonstrou que existem aspectos assimétricos distintos que determinam o perfil da onda uma vez que características assimétricas presentes em menor magnitude em um determinado parâmetro, podem ficar mais evidentes em outro, como pôde ser notado nos exemplos de ondas de Stokes e dente de serra apresentados.



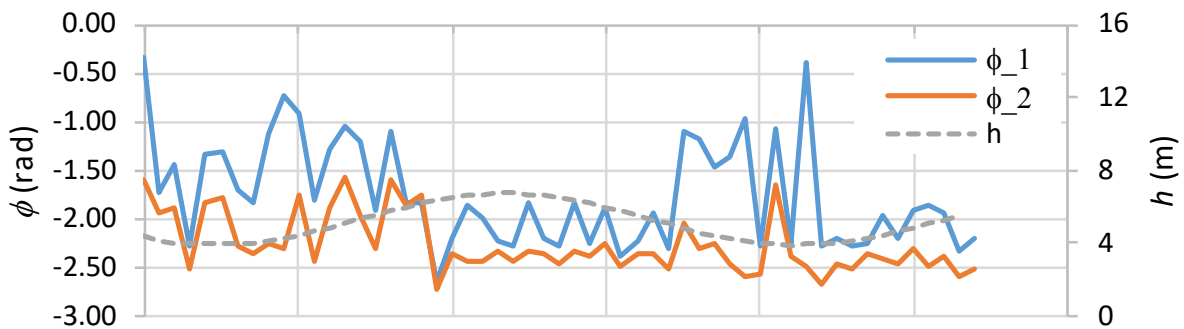
## a) PT5



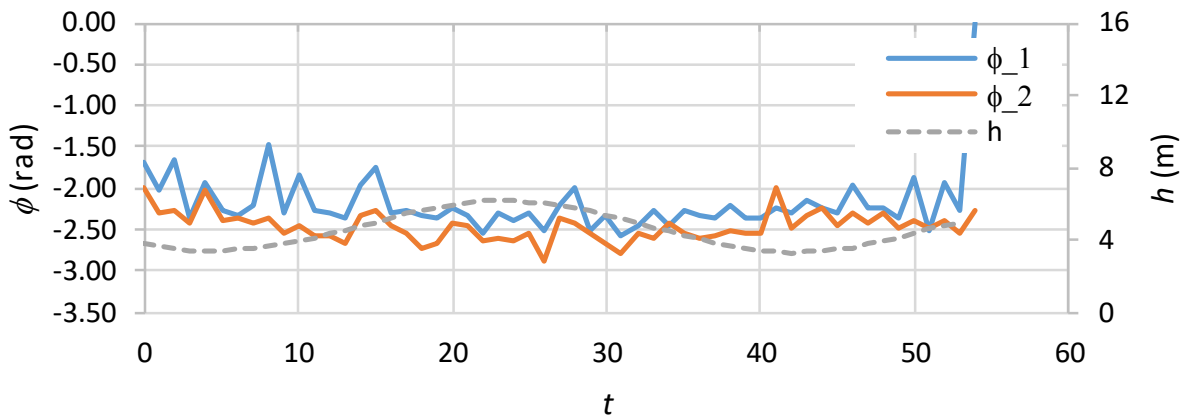
## b) PT8



## c) PT3



## d) PT1

Figura 4.25 – Parâmetro de Forma ( $\phi$ ) por Tempo ( $t$ ) para os PT a) 5, b) 8, c) 3 e d) 1.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente capítulo contém as principais conclusões e os consequentes desenvolvimentos futuros que resultaram da elaboração deste estudo. Pretendeu-se testar e validar um conjunto de técnicas aplicadas a dados de campo obtidos por meio de transdutores de pressão para a caracterização do comportamento do mar na Praia de São Jacinto, em Aveiro, Portugal.

Ao longo do presente estudo, foram apresentadas algumas características das ondas geradas pelo vento, no sentido de destacar os seus processos não lineares e não estacionários. Contudo, também foi discutida a dificuldade e possíveis equívocos ao se representar este tipo de ondas através da tradicionalmente usada Transformada de Fourier, o que motivou a ideia de se aplicar outro tipo de técnicas, a Transformada por Ondulas e a Transformada de Hilbert-Huang.

Além disso, complementarmente aos resultados obtidos pelos espectros, viu-se uma oportunidade de caracterizar as assimetrias das ondas por meio do método proposto por Abreu *et al.* (2010, 2011).

#### 5.1 CONCLUSÕES

Neste estudo faz-se uma descrição detalhada do comportamento assimétrico das ondas geradas por vento ao se propagarem pela zona de transformação. Os resultados obtidos baseiam-se em dados provenientes da campanha de campo realizada pelo projeto RAIA e pela Marinha de Portugal, na praia de São Jacinto, em Aveiro, nos dias 18 e 19 de junho de 2015. Dentre os dados obtidos na campanha, para efeito deste estudo, foram processadas as pressões instantâneas obtidas por oito Transdutores de Pressão instalados ao longo do perfil transversal da praia.

Para compreender o comportamento das ondas não lineares e não estacionárias recorreu-se primeiramente a aplicação da Transformada por Ondulas e da Transformada de Hilbert-Huang aplicadas a dados de campo. Os resultados foram confrontados com aqueles obtidos pela Transformada de Fourier a fim de identificar as vantagens oferecidas pelas transformadas alternativas. As comparações comprovaram a eficiência das duas técnicas em obter informações de frequência ao longo do tempo. Entre outros, as técnicas possibilitam a caracterização da formação de grupos de ondas, a

transferência/dissipação de energia aquando da propagação para a linha de costa e a presença de assimetrias, através da presença de harmónicos de ordem superior. O amplo conjunto de dados também permitiu que fossem observadas as diferenças presentes nos resultados de ambas diante da variação das marés e da localização dos medidores que se refletiu na aquisição de dados a diferentes profundidades.

As transformadas demonstraram-se complementares, a Transformada por Ondulas oferece resultados de fácil visualização, sendo capaz de identificar mudanças de comportamento das ondas seja durante o tempo ou conforme caminham pela praia. A HHT apresenta a mesma capacidade com um grau de detalhamento maior uma vez que oferece um espectro com pontos instantâneos de energia, o que possibilita a análise do que ocorre dentro dos focos de energia apresentados pelo Espectro de Ondulas. Percebeu-se que durante a aplicação das transformadas é importante observar a finalidade de sua aplicação para cada caso pois a HHT, pelo seu grau de detalhamento, torna a visualização e obtenção de conclusões mais trabalhosa que a Transformada por Ondulas. De maneira geral, os resultados das transformadas foi concordante, comprovando-se o aumento de não linearidades conforme as ondas se aproximam da praia e demonstrando que essa característica é intensificada durante a baixa-mar quando a interação com o fundo torna-se maior em função da diminuição da profundidade da água.

Em um segundo momento, aplicaram-se as fórmulas desenvolvidas por Abreu *et al.* (2011) aos mesmos dados de campo agora sem ruídos, por aplicação de dois filtros, o filtro *Filtfilt* e o filtro *Butterworth*, obtendo-se gráficos de parâmetros representativos das assimetrias, como  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\phi$ , que refletem as características não lineares do movimento orbital (ABREU *et al.*, 2011). Os resultados obtidos nesta etapa do estudo foram concordantes para ambos os filtros e confirmaram o aumento de não linearidades em águas rasas, principalmente durante as duas baixa-mares acompanhadas. Além disso, viabilizaram a identificação de maiores assimetrias na região do PT8 que apresentou parâmetros distintos das tendências a sua volta e permitiram detectar a transmissão de energia para harmónicos com frequências mais elevadas, sobretudo, aquando da diminuição de profundidade.

A caracterização dessas não linearidades é essencial a descrição do comportamento do transporte sedimentar e deve ser levado em conta durante o planejamento preventivo e para elaboração de projetos de intervenção costeira. Desta forma, urge a aplicação de novas metodologias como aquelas que foram estudadas neste trabalho, pois apresentam claras vantagens em locais de águas rasas, onde o trânsito sedimentar é mais intenso.

## 5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante a segunda análise dos dados, feita por meio dos parâmetros de assimetria das ondas, observou-se que o PT8 obteve resultados divergentes da tendência apresentada pelos demais PT nos gráficos da

secção 4.2. A causa dessa mudança de comportamento poderia ser investigada por meio das informações batimétricas da praia, possibilitando identificar a existência de barras litorais submersas, por exemplo. Entretanto, estes dados não foram obtidos na campanha de campo estudada. Em razão disso, segue como sugestão para futuras pesquisas e campanhas, que seja realizado um levantamento batimétrico detalhado em torno dos equipamentos de medição instalados para garantir um melhor entendimento dos processos e da análise efetuada.

Para mais, este trabalho apresenta uma quantidade considerável de gráficos para as quatro metodologias aplicadas e estes estão inclusos em anexo. É de se considerar que outras análises podem ser feitas, por exemplo, uma análise comparativa detalhada entre os resultados dos parâmetros assimétricos e dos espectros ou análises mais detalhadas de cada PT de acordo com a região em que se encontram, colaborando para que o conhecimento acerca dos benefícios e possibilidades oferecidos pelas metodologias mais recentes seja consolidado. Além disso, a praia de São Jacinto, não apresenta histórico de erosão costeira, os dados do presente estudo podem ser futuramente comparados com dados de praias onde a erosão é característica. Outro exemplo de análise seria a divisão das Alturas Significativas ( $H_s$ ) obtidas pela profundidade local com a finalidade de obter informações sobre a arrebentação das ondas e interpretar melhor os processos que ocorrem na região.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, T. *et al.* – *Analytical approximate wave form for asymmetric waves. Coastal Engineering.* (2010).

ABREU, T. *et al.* – Influência de ondas assimétricas no transporte de sedimentos: medição e modelação. (2010), p. 4.

ABREU, T. *et al.* – Análise Espectral de Ondas Sintéticas Não Lineares e Não Estacionárias. 3ª Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira. Universidade de Algarve, 2015. 14-15.

ABREU, T. *et al.* – Ondas assimétricas em praias com barra. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 2011(3), 297–306. Disponível na internet: <<https://doi.org/10.5894/rgci266>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

AGUIAR, R. *et al.* – *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* (SIAM). Portugal, 2006. Disponível em: <[file:///C:/Users/Jaqueline/Downloads/8\\_HumanHealth.pdf](file:///C:/Users/Jaqueline/Downloads/8_HumanHealth.pdf)>. Acesso em: 07 dez. 2018.

AIRY, G.B. (1841). *Tides and waves.* Encyclopedia Metropolitana, 396 pp.

BARBOSA, A.C.B. e BLITZKOW, D. (2008). *Ondaletas: História e aplicação* (apostila). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

BECKMAN, T. *Tsunami!* (2016). Disponível em: <<https://whybecausescience.files.wordpress.com/2014/03/shoaling.jpg>>. Acesso em: 08 ago. 2018.

BIRD, E.C.F. – *Coastal Geomorphology: An introduction. 2nd edition. Chichester. Wiley and Sons.* 2008. 436 pp.

BRASIL. IBGE. Censo Demográfico, 2000. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 22 fev. 2018.

CHADWICK, A., MORFETT, J. e BORTHWICK, N. (2017). *Hidráulica para engenharia civil e ambiental.* Tradução da 5ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier. ISBN 978-85-352-6557-6

DALRYMPLE, R. A. – *Wave Propagation in Shallow Water.* 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.2112/SI65-064.1>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

ELGAR, S.; GUZA, R.T. (1985). *Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. Journal of Fluid Mechanics*, 161:425-448. DOI:10.1017/S0022112085003007.

FERRARO, N. G. – Conceito de onda. *Natureza das ondas. Tipos de Ondas.* São Paulo. 2016. Disponível em: <[http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2016/11/cursos-do-blog-termologia-optica-e-ondas\\_15.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2016/11/cursos-do-blog-termologia-optica-e-ondas_15.html)>. Acesso em: 13 mai. 2018.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERRARO, N. G. – Física: Conceito e Classificação das Ondas. 2017. Disponível em: <<https://www.maiseducacao.blog.br/2017/09/fisica-conceito-e-classificacao-das.html>>. Acesso em: 13 mai. 2018.
- GONZALEZ, R.C., WOODS, R. E. – *Digital Image Processing*. 2ª ed. Prentice Hall, 2002. ISBN 0201180758
- GOOGLE. Google Maps. Praia de São Jacinto, Portugal. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/S%C3%A3o+Jacinto+Beach/@40.66947,-8.7487437,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0xd23968048f4e533:0x7e94325b0216cd03!8m2!3d40.669466!4d-8.746555>>. Acesso em: 06 mar. 2018.
- HUANG, N.E. et al. (1996) – “The Mechanism for Frequency Down-shift in Nonlinear Wave Evolution”, *Adv. Appl. Mech.*, v. 32.
- HUANG, N.E. et al (1998) – “The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis”, *Proc. R. Soc. London*, v. Ser. A.
- INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA E DAS FLORESTAS. Reserva Natural das Dunas de São Jacinto. Disponível em: <<http://www2.icnf.pt/portal/ap/r-nat/rndsj>>. Acesso em: 30 nov. 2018.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO (2018). RAIA - Observatório oceânico da margem ibérica. Disponível em: <<http://www.hidrografico.pt/raia.php>>. Acesso em: 12 abr. 2018.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO DA MARINHA PORTUGUESA. Campanha de medição da corrente de deriva litoral. Youtube, 06 ago. 2015. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=U2LbD5txgJQ>>. Acesso em: 13 mai. 2018.
- LIU, P.C. (2000) - “Wave Grouping Characteristics in Nearshore Great Lakes I”, *Ocean Engineering*, v. 20.
- MALAFIA, R. Evolução recente da linha da costa entre a zona de Espinho Sul e a zona de Esmoriz (Aveiro). Boletim do Instituto Geográfico do Exército, 2012, nº 74. Disponível em: <[http://www.igeoe.pt/downloads/file38\\_pt.pdf](http://www.igeoe.pt/downloads/file38_pt.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2018
- MATOS, J. M. M. B. – Estudo da hidrodinâmica costeira com recurso a diferentes técnicas espectrais. Porto: ISEP, 2017. 95 p. Dissertação (Mestrado).
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Estudo Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro. Brasília, 2006. Disponível em: <[http://mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_publicacao/78\\_publicacao12122008084856.pdf](http://mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_publicacao/78_publicacao12122008084856.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2018.
- MOURA, T. G. R. De. – Aplicação da Transformada de Hilbert–Huang para o Estudo de Ondas Medidas por PUV. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- NEVES, C. F. et al – *A Formal Derivation and Numerical Modelling of the Improved Boussinesq Equations for varying Depth. Ocean Engng.* ISSN 2318-0331. Vol.23:8 (1996), 691-704.
- NEVES, C. F. et al – Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang para Caracterização da Dinâmica Costeira - Parte 1: Grandezas Escalares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* ISSN 2318-0331. Vol.17:2 (2012), 143-156.
- OLIVEIRA, H. M. – Análise de Fourier e Wavelets: sinais estacionários e não estacionários. 1ª ed. Recife: Editora Universitária, UFPE, 2007. ISBN 978-85-7315-417-7

ROCHA, M. (2013). *Parameterizations of wave nonlinearity from local wave parameters: a comparison with field data*. *Journal of Coastal Research*. Disponível em: <<https://doi.org/10.2112/SI65-064.1>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

ROCHA, M. *et al.* – *Parameterizations of wave nonlinearity from local wave parameters: a comparison with field data*. *Journal of Coastal Research*. 2013.

SOUZA, P. H. G. O. – Erosão Costeira. Instituto Oceanográfico, 2009. Disponível em: <<http://www.vsbo.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/50-portugues/publicacoes/series-divulgacao/gestao-costeira/823-erosao-costeira>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

STOKES, G.G. (1847). *On the theory of oscillatory waves*. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8, 441. Disponível em: <<http://pordlabs.ucsd.edu/wryoung/theorySeminar/pdf15/Stokes1847.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

TEIXEIRA, M. M. – “Transdutor” ; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/transdutor.htm>>. Acesso em: 19 abr. 2018.

TSCHIFFELI, A. *et al.* – Erosão costeira: o que acontecerá a Portugal nos próximos 50/60 anos?. Trabalho apresentado para formação na Escola Secundária Dr. João Manuel da Costa Delgado, 2015, Aveiro. Disponível em: <<http://www2.icnf.pt/portal/ap/r-nat/rndsj>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

VASCONCELLOS, T. Ondas. – Mundo Física – ENEM. Youtube, 2017. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=OldPQDsetDk&t=3s>>. Acesso em: 13 mai. 2018.

WIKIPEDIA. Waveforms.png. 2005. Disponível em: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Waveforms.png>>. Acesso em: 31 set. 2018.





## ANEXOS

A seguir apresenta-se a sequência de anexos.

Os anexos apresentados correspondem aos resultados gráficos elaborados durante o desenvolvimento deste trabalho para realização da análise. Estão aqui dispostos para prezar por uma boa apresentação da discussão dos resultados no Capítulo 4, portanto servem de complemento para as análises efetuadas e por isso também foram citados no decorrer do texto.

Anexo I a VI - Espectros de Fourier: apresentam-se aqui os Espectros de Fourier para os 6 Intervalos analisados, cada um com o espectro dos 8 PT.

Anexo VII a XII - Espectros de Ôndulas: apresentam-se aqui os Espectros de Ôndulas para os 6 Intervalos analisados, cada um com o espectro dos 8 PT.

Anexo XIII a XVIII - Espectros de Hilbert-Huang: apresentam-se aqui os Espectros de Hilbert-Huang para os 6 Intervalos analisados, cada um com o espectro dos 8 PT.

Anexo XIX - Gráficos de Altura Significativa ( $H_s$ ) por tempo ( $t$ ) para os 8 PT durante todo o período da campanha.

Anexo XX - Gráficos de Período de Pico ( $T_p$ ) por Tempo ( $t$ ) para os 8 PT durante todo o período da campanha.

Anexo XXI - Gráficos de Coeficiente de Assimetria das Velocidades ( $R$ ) por Tempo ( $t$ ) para os 8 PT durante todo o período da campanha.

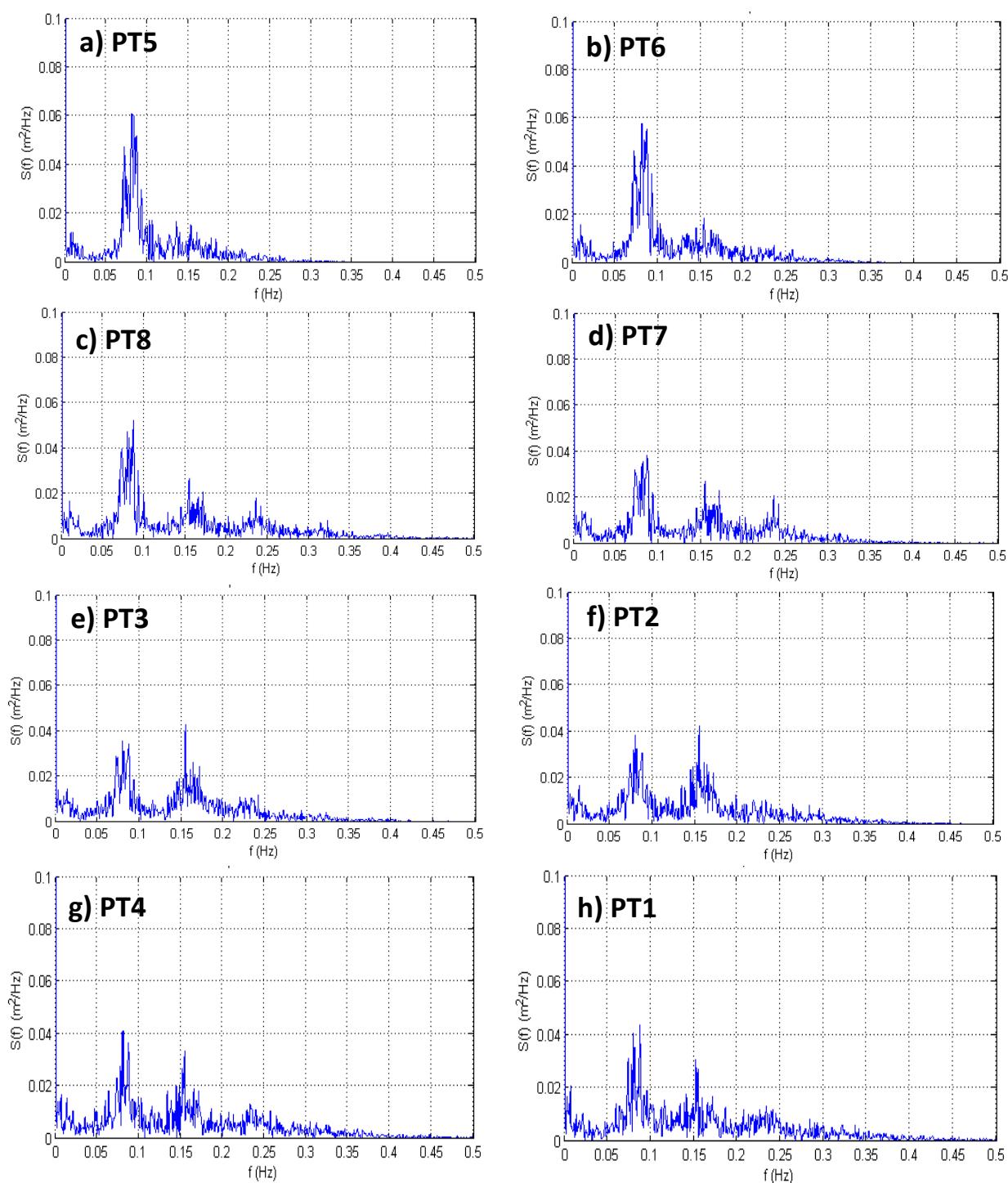
Anexo XXII - Gráficos de Coeficiente  $\alpha$  por Tempo ( $t$ ) para os 8 PT durante todo o período da campanha.

Anexo XXIII - Gráficos de Índice Assimétrico ( $r$ ) por Tempo ( $t$ ) para os 8 PT durante todo o período da campanha.

Anexo XXIV - Gráficos de Parâmetro de Forma ( $\bar{\mu}$ ) por Tempo ( $t$ ) para os 8 PT durante todo o período da campanha.



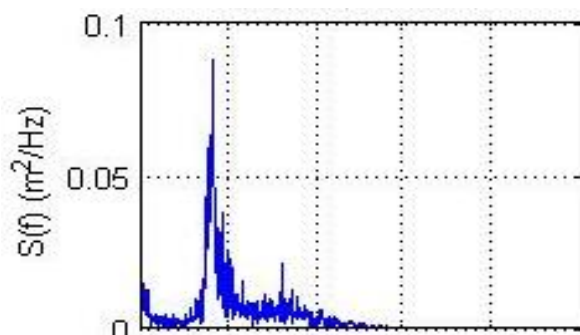
## Anexo I – Espectros de Fourier para o Intervalo 1



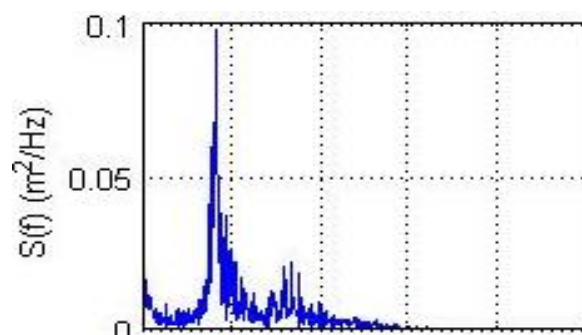


## Anexo II – ESPECTROS DE FOURIER PARA O INTERVALO 2

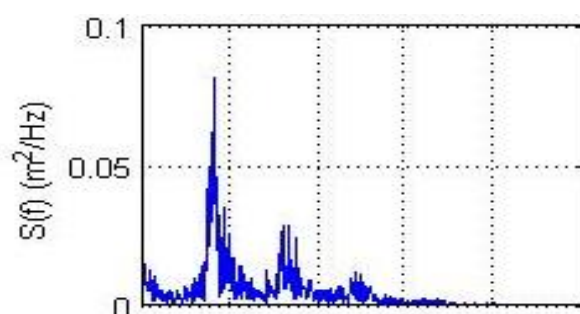
a) PT5



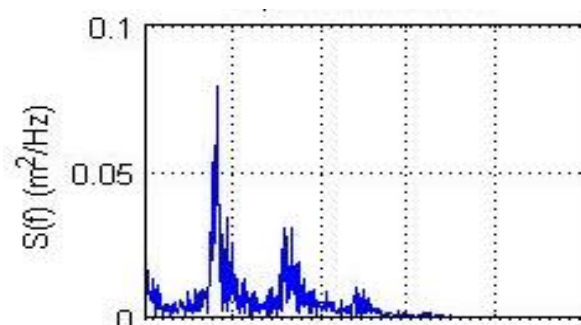
b) PT6



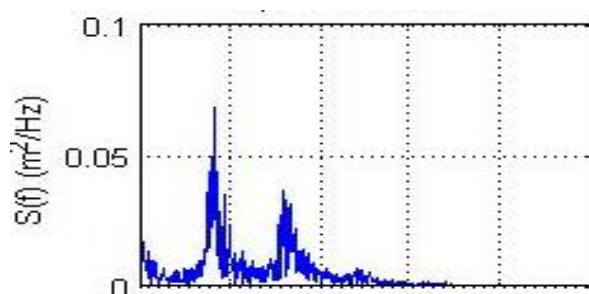
c) PT8



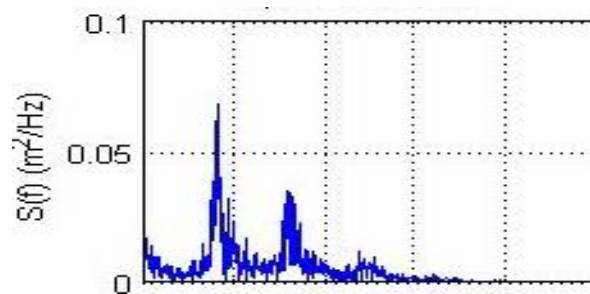
d) PT7



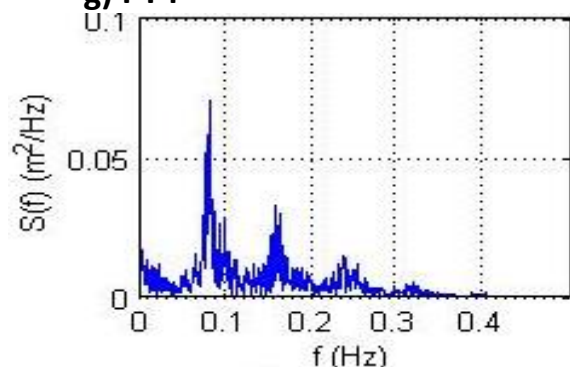
e) PT3



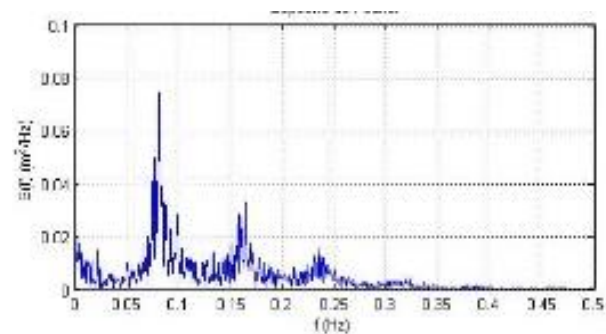
f) PT2



g) PT4

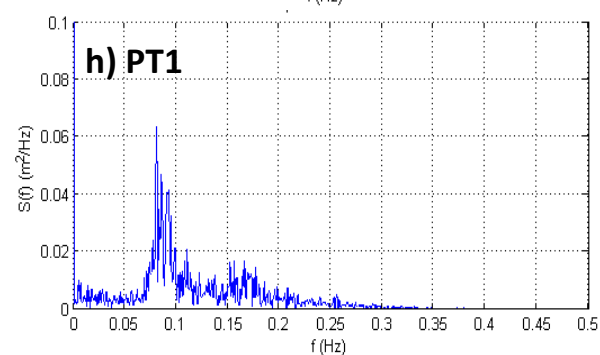
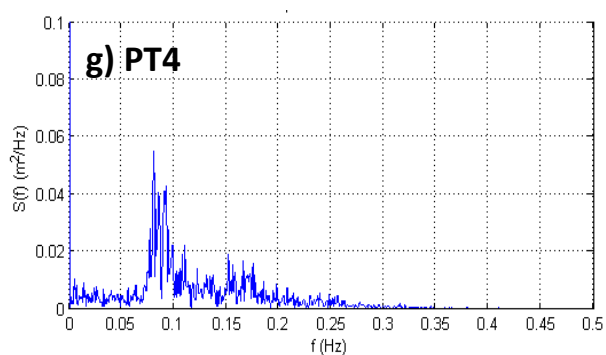
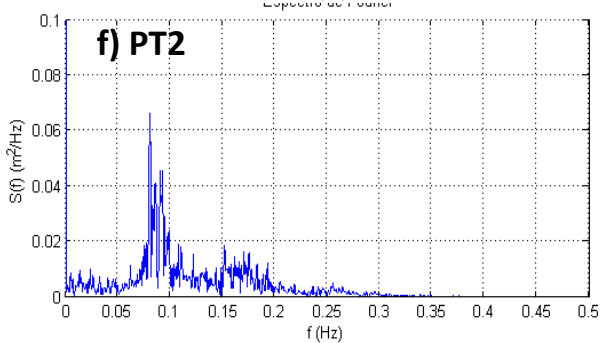
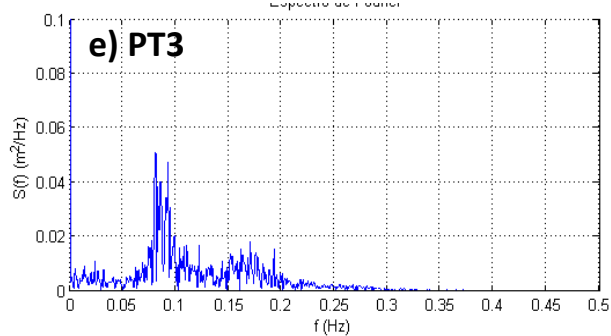
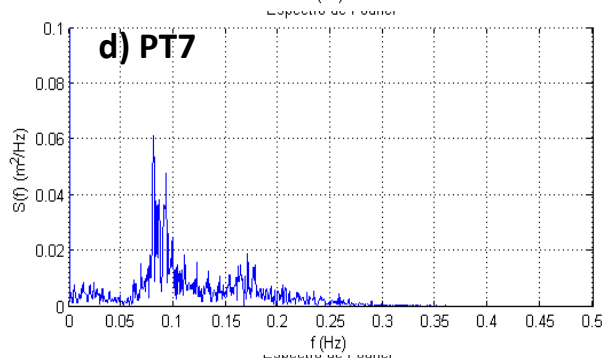
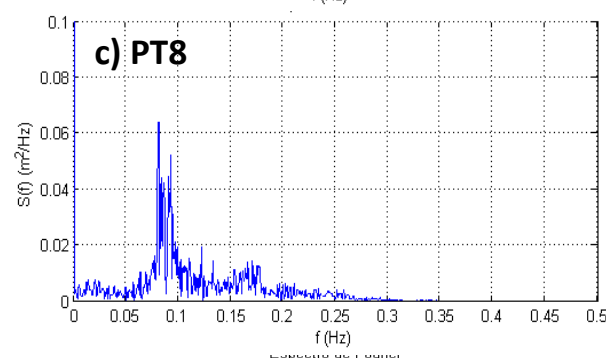
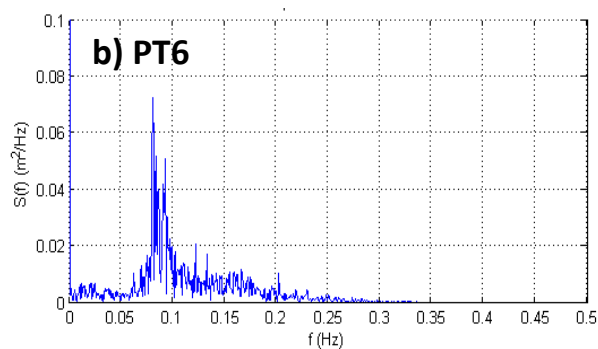
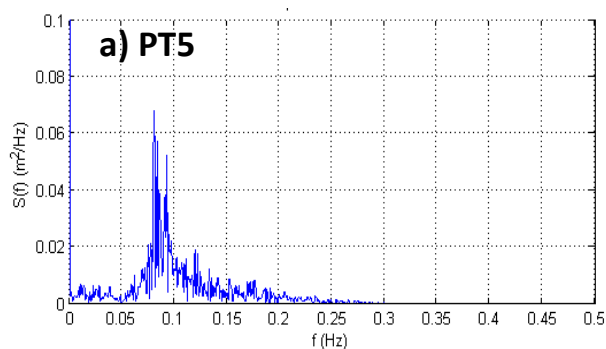


h) PT1





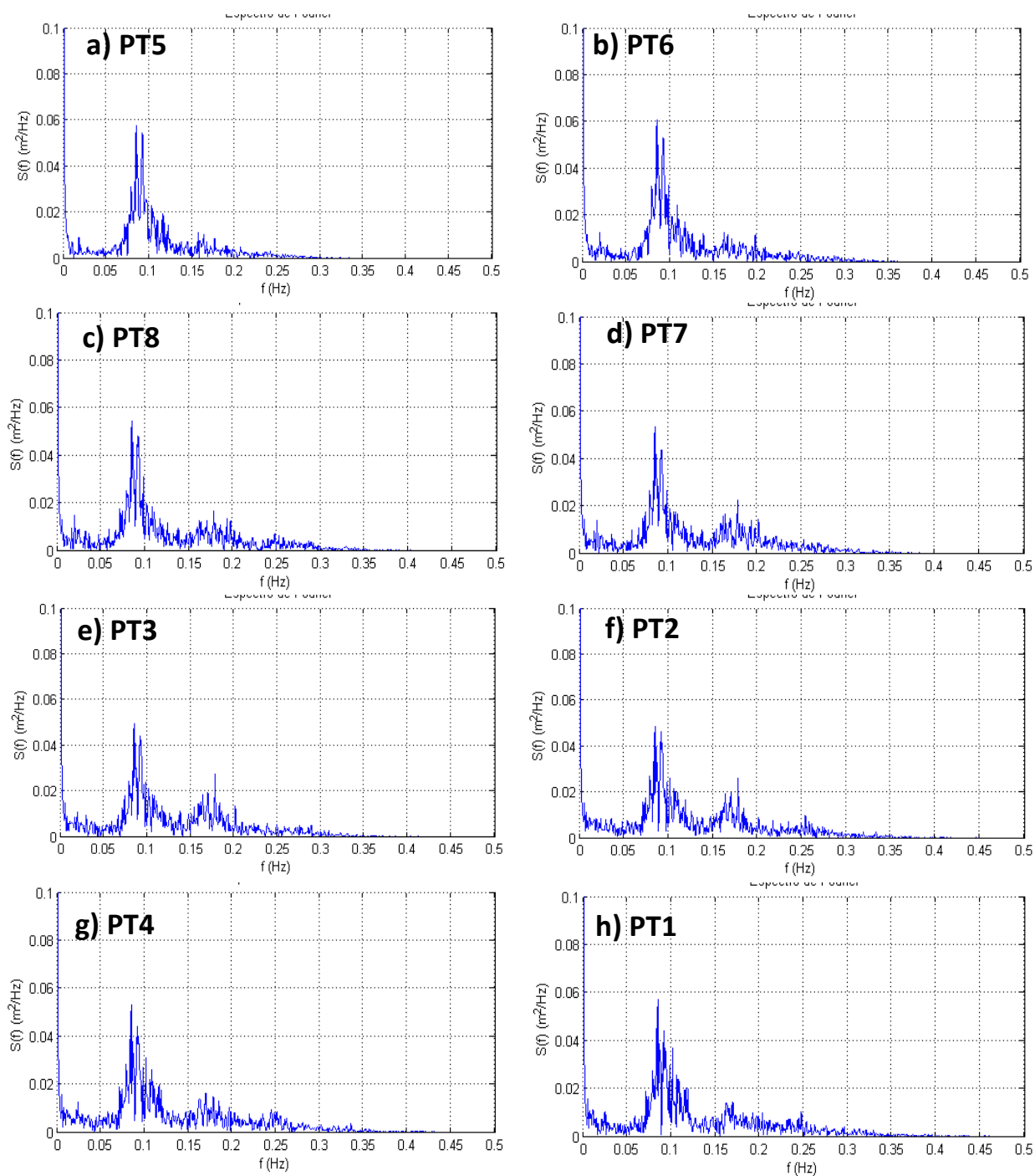
## Anexo III – Espectros de Fourier para o Intervalo 3





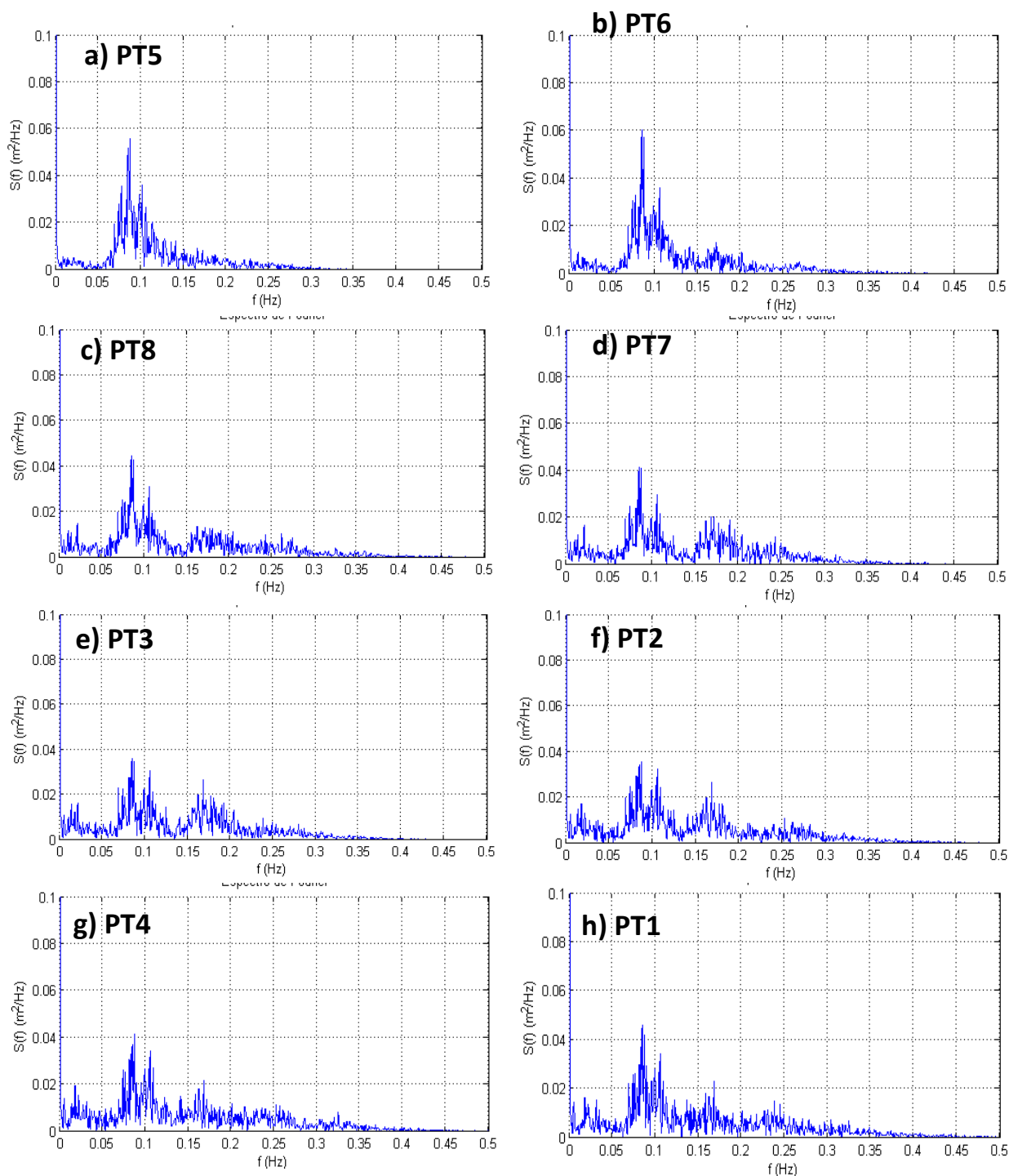


## Anexo IV – Espectros de Fourier para o Intervalo 4



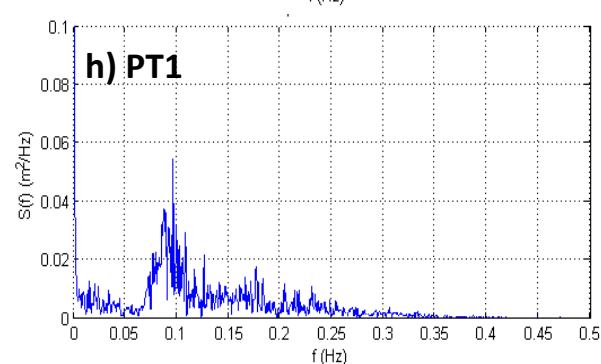
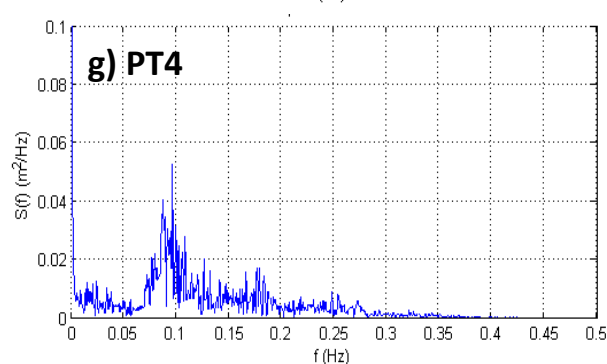
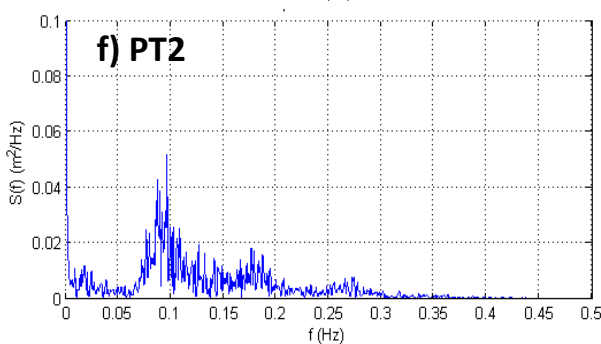
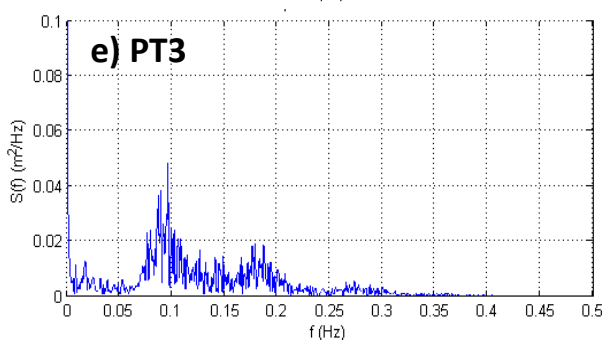
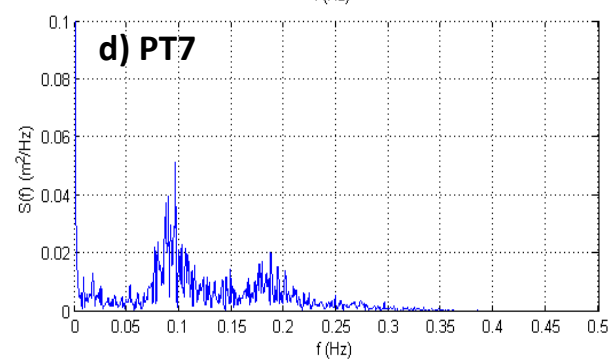
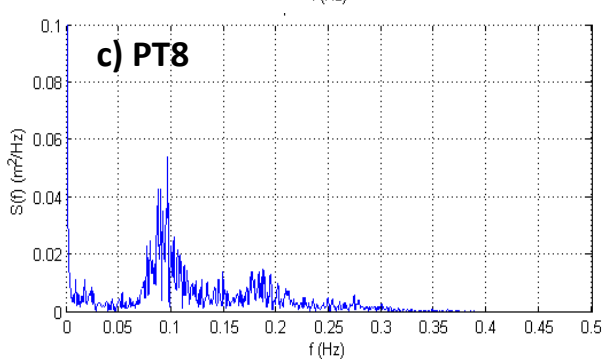
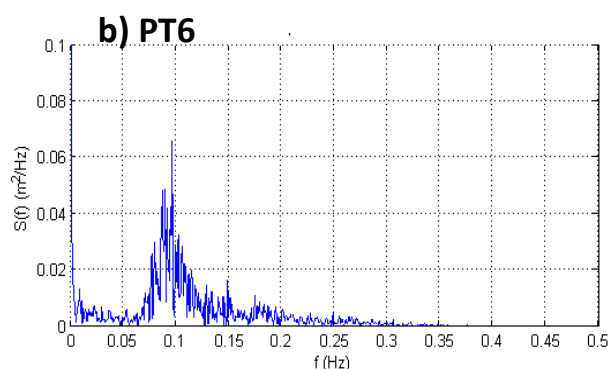
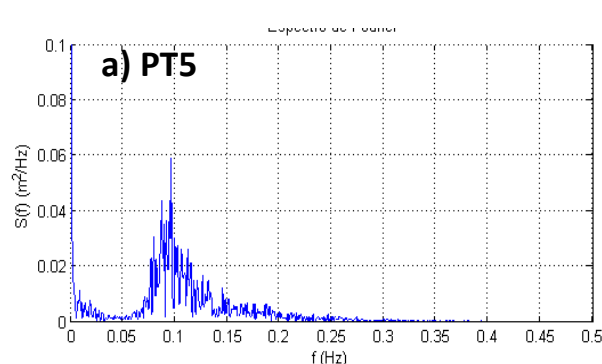


## Anexo V – Espectros de Fourier para o Intervalo 5



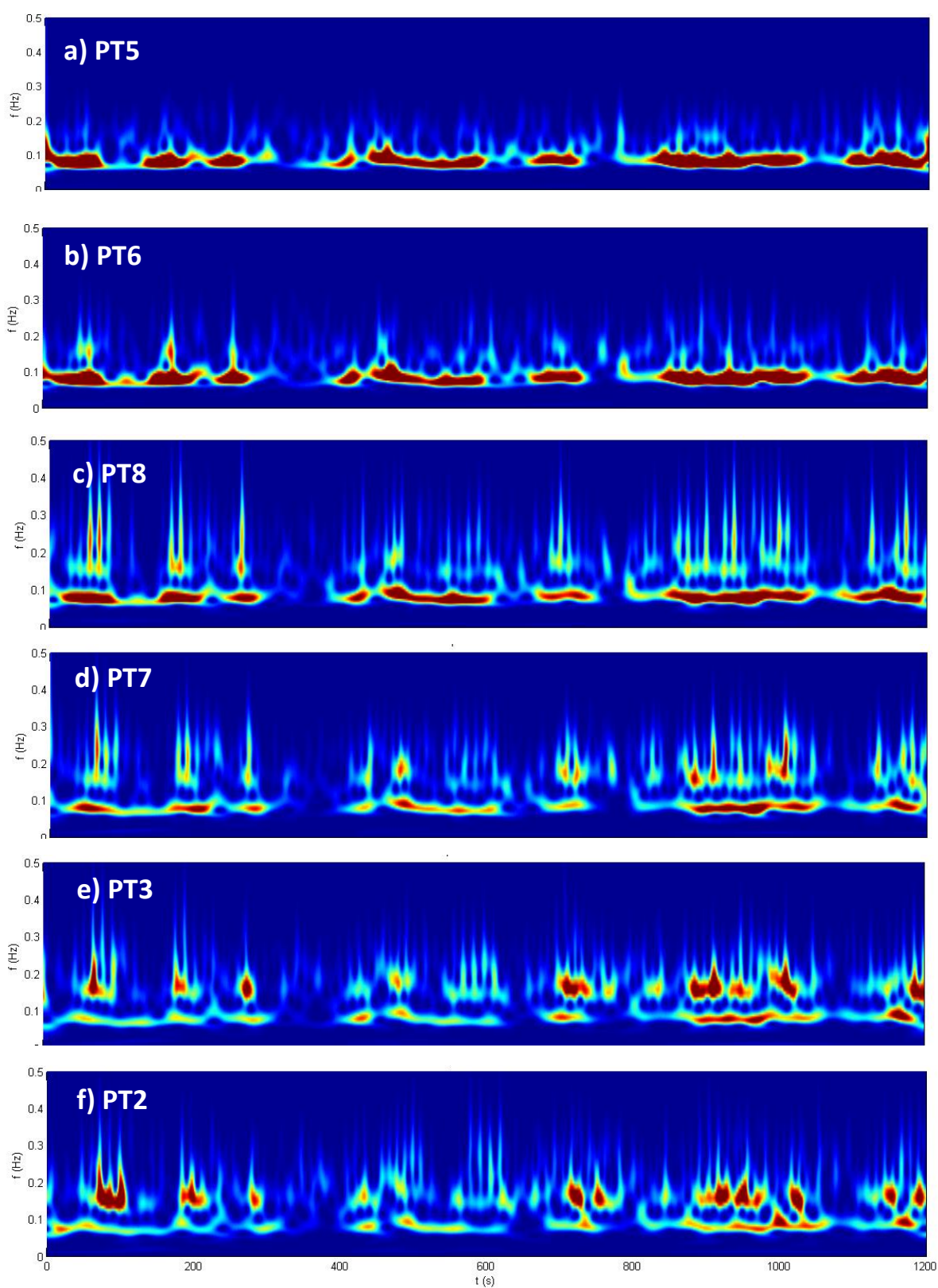


## Anexo VI – Espectros de Fourier para o Intervalo 6

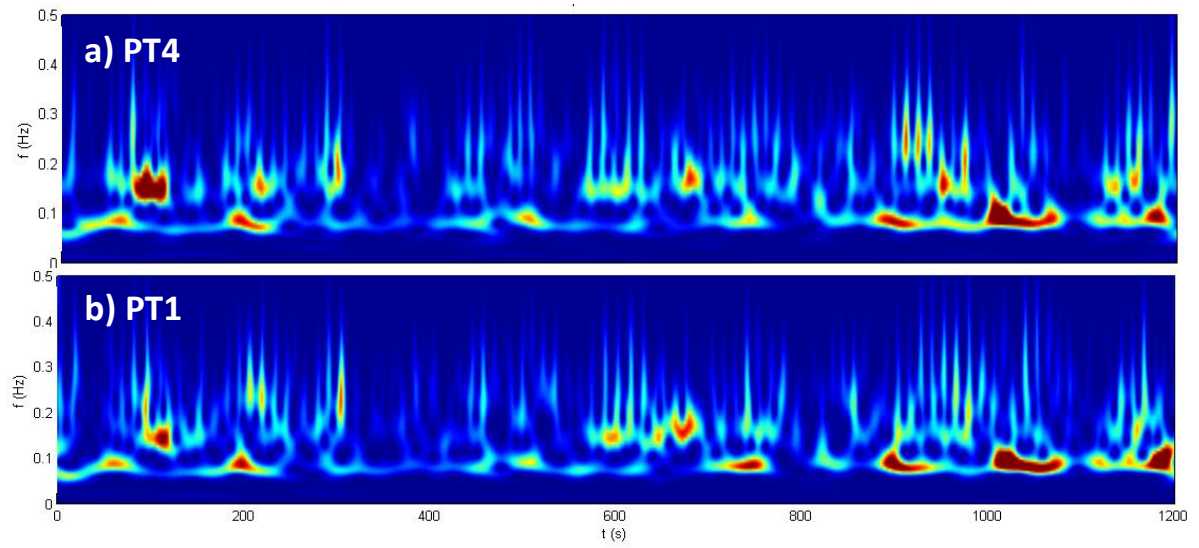




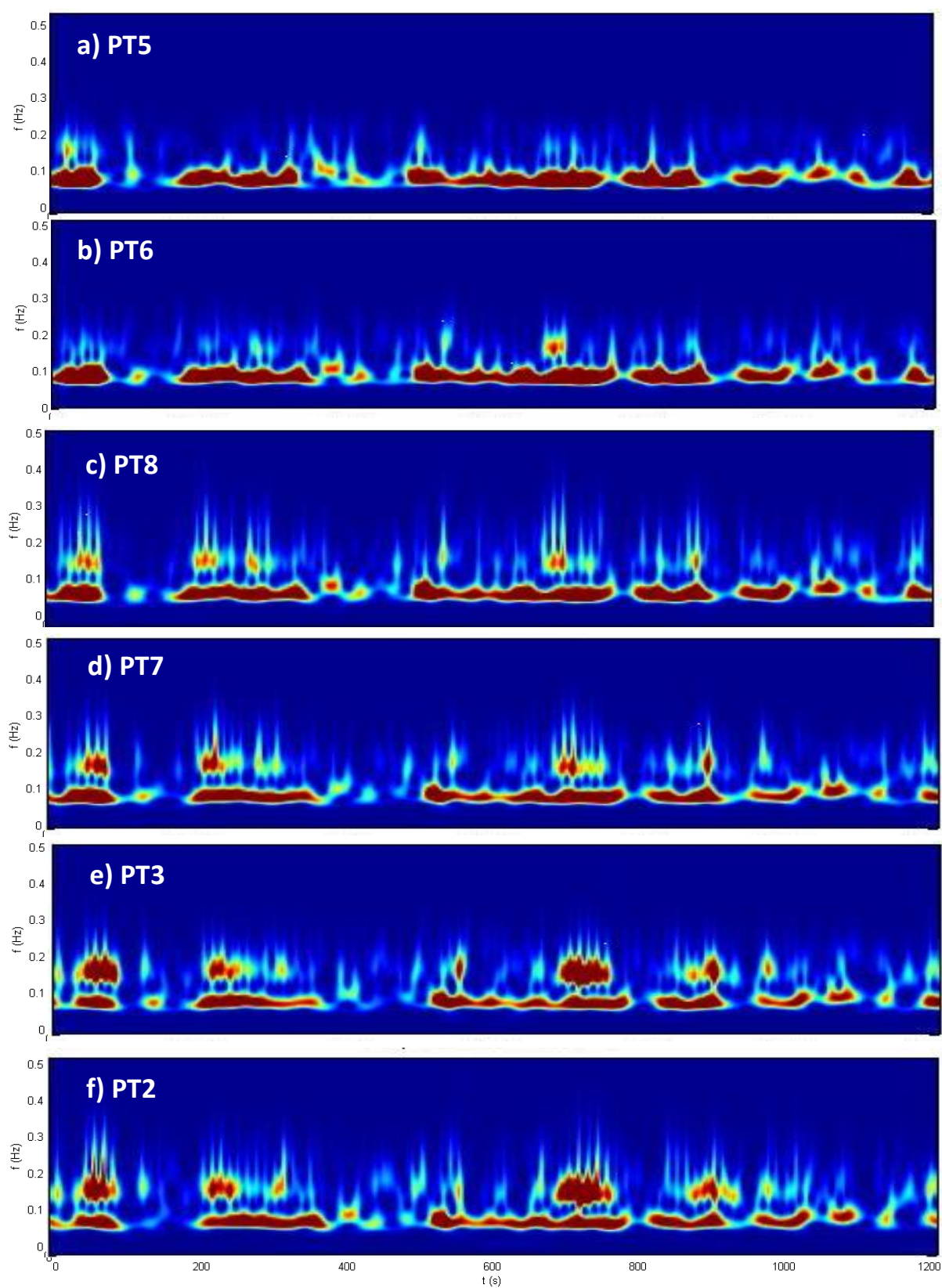
## Anexo VII – Espectros de Ôndulas para o Intervalo 1

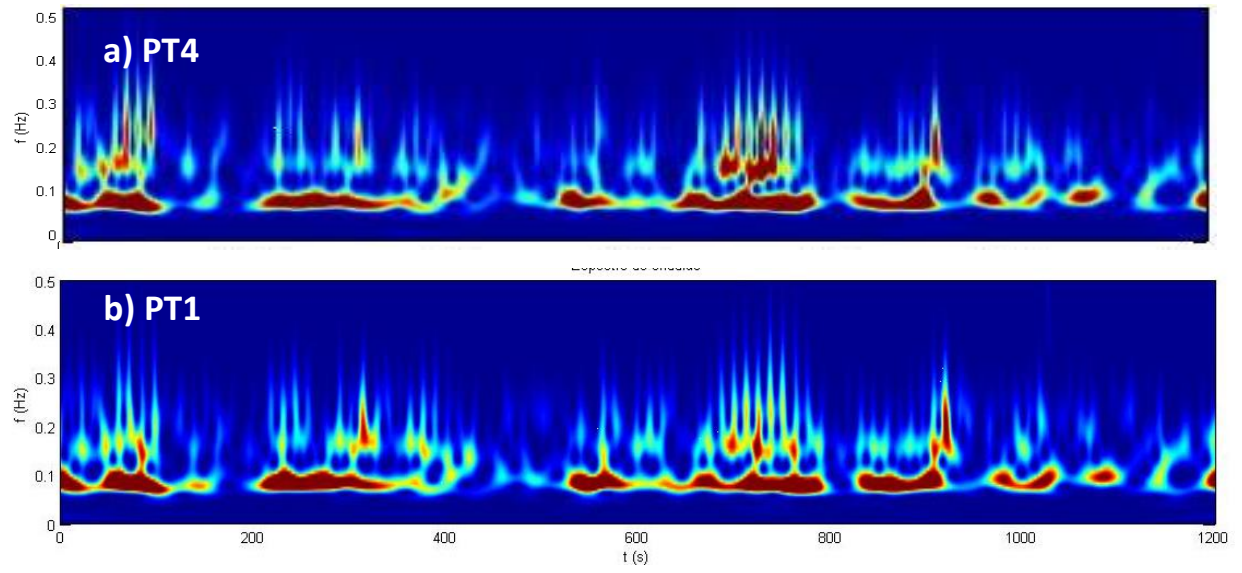




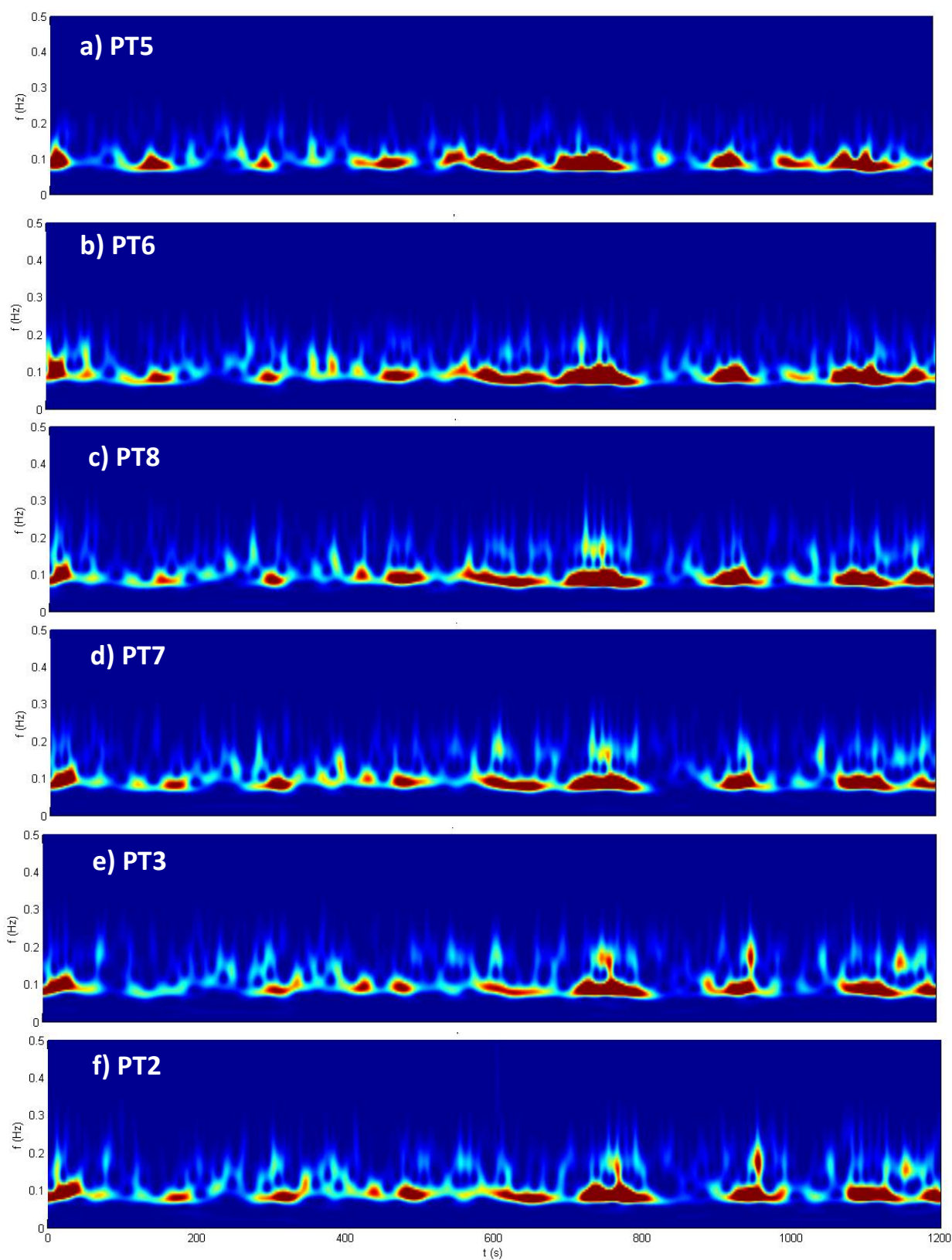


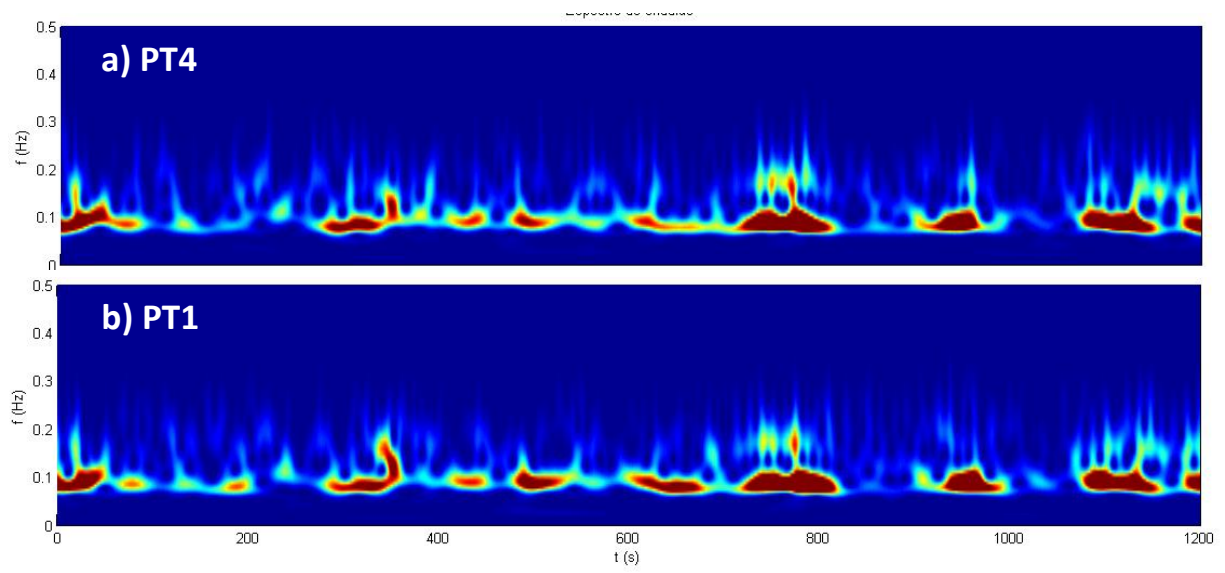
## Anexo VIII – Espectros de Ôndulas para o Intervalo 2





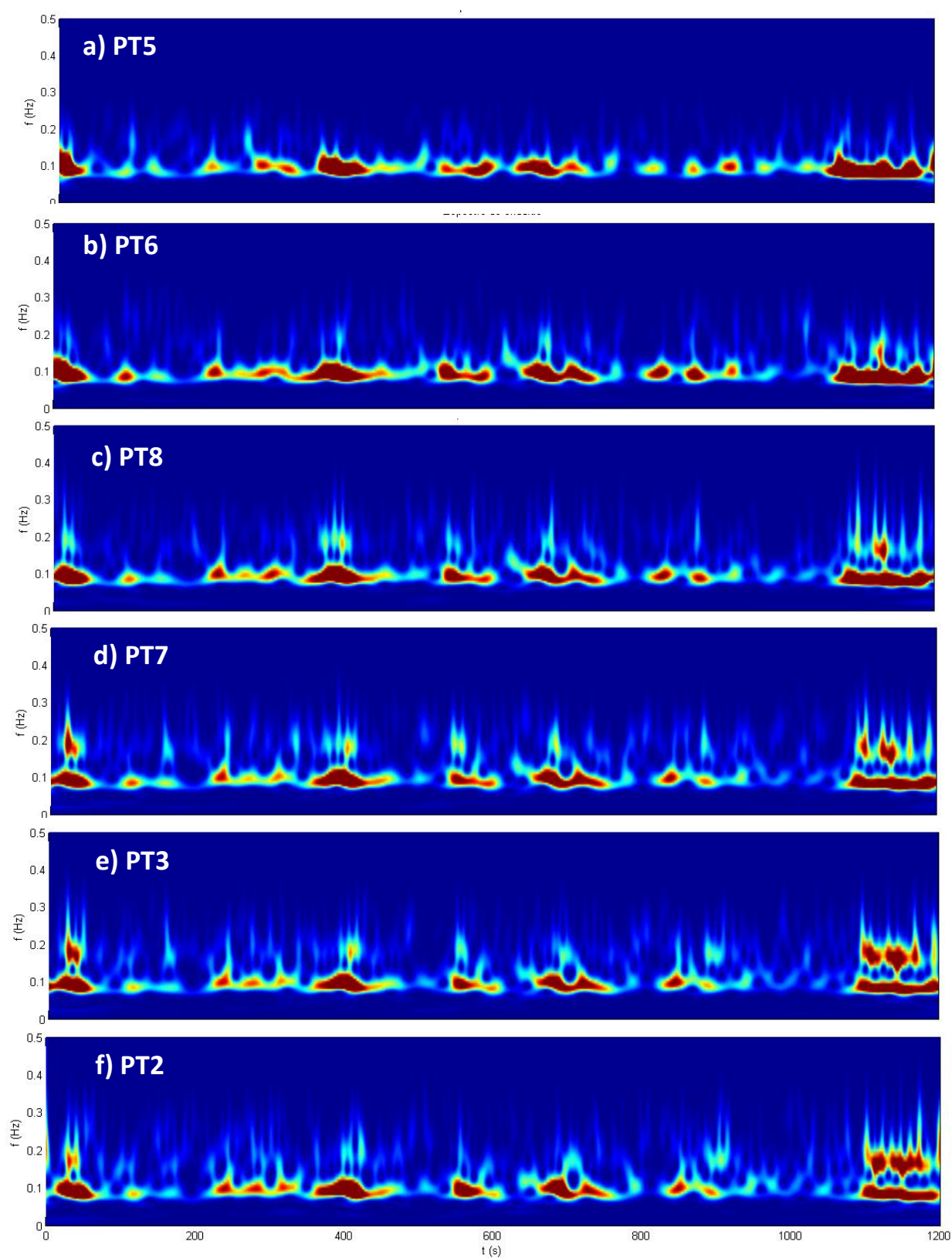
## Anexo IX – ESPECTROS DE ÔNDULAS PARA O INTERVALO 3

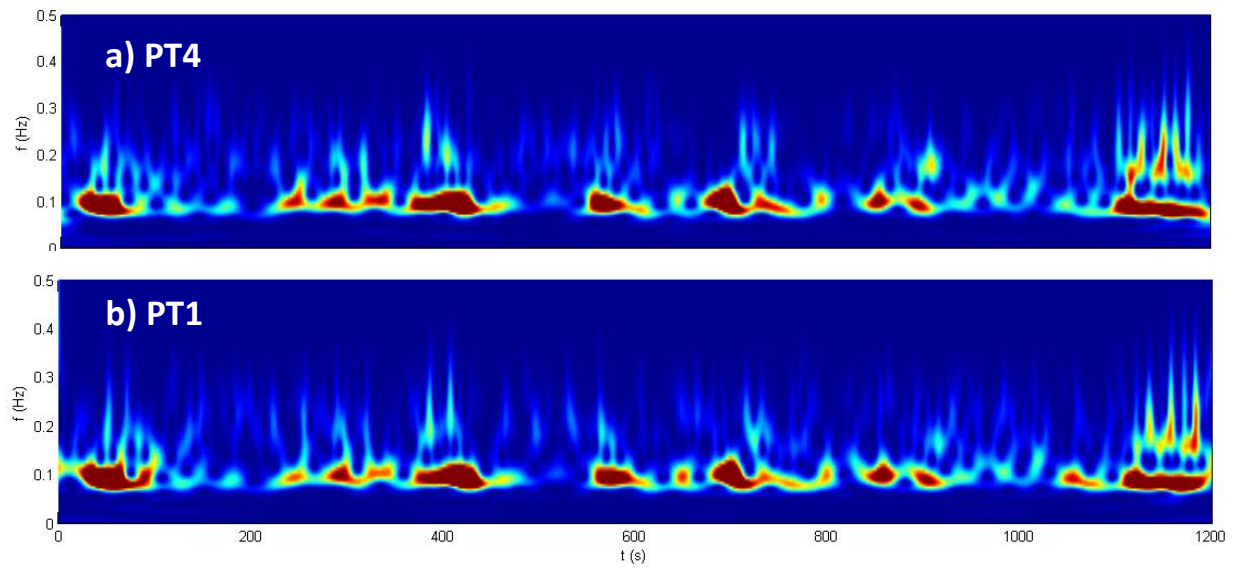




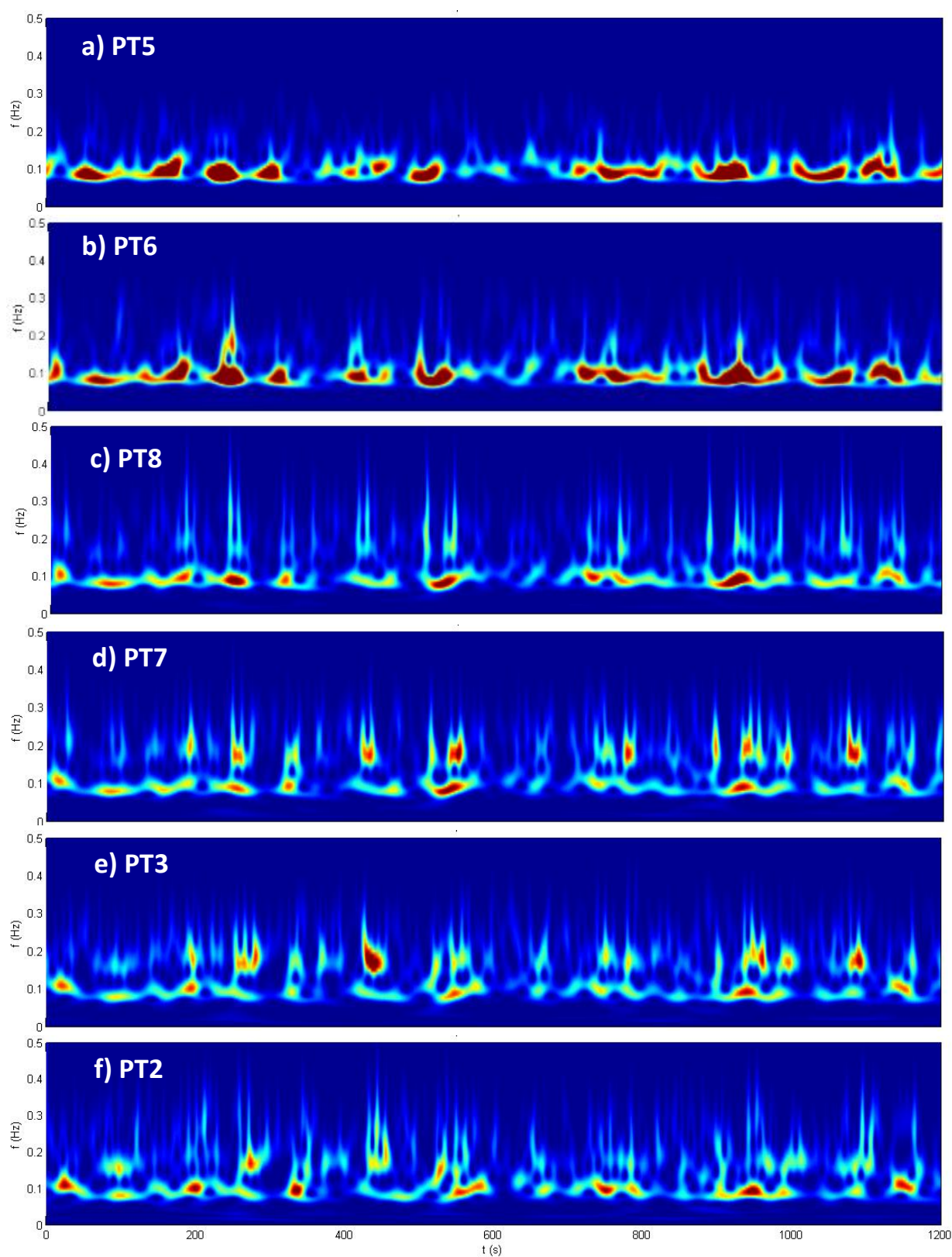


## Anexo X – Espectros de Ôndulas para o Intervalo 4

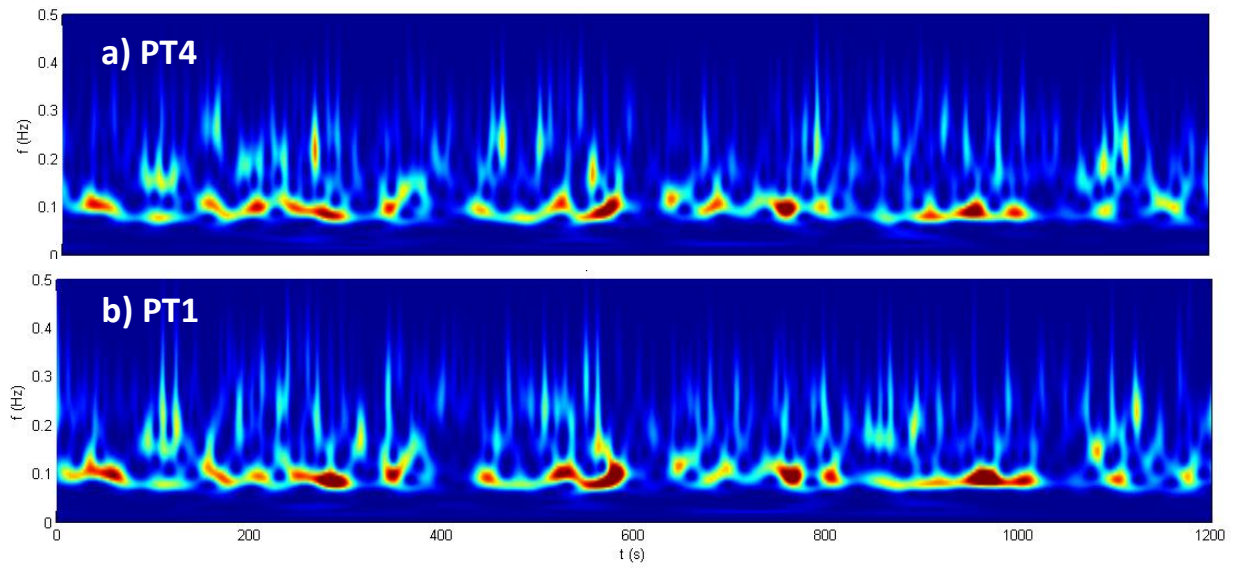




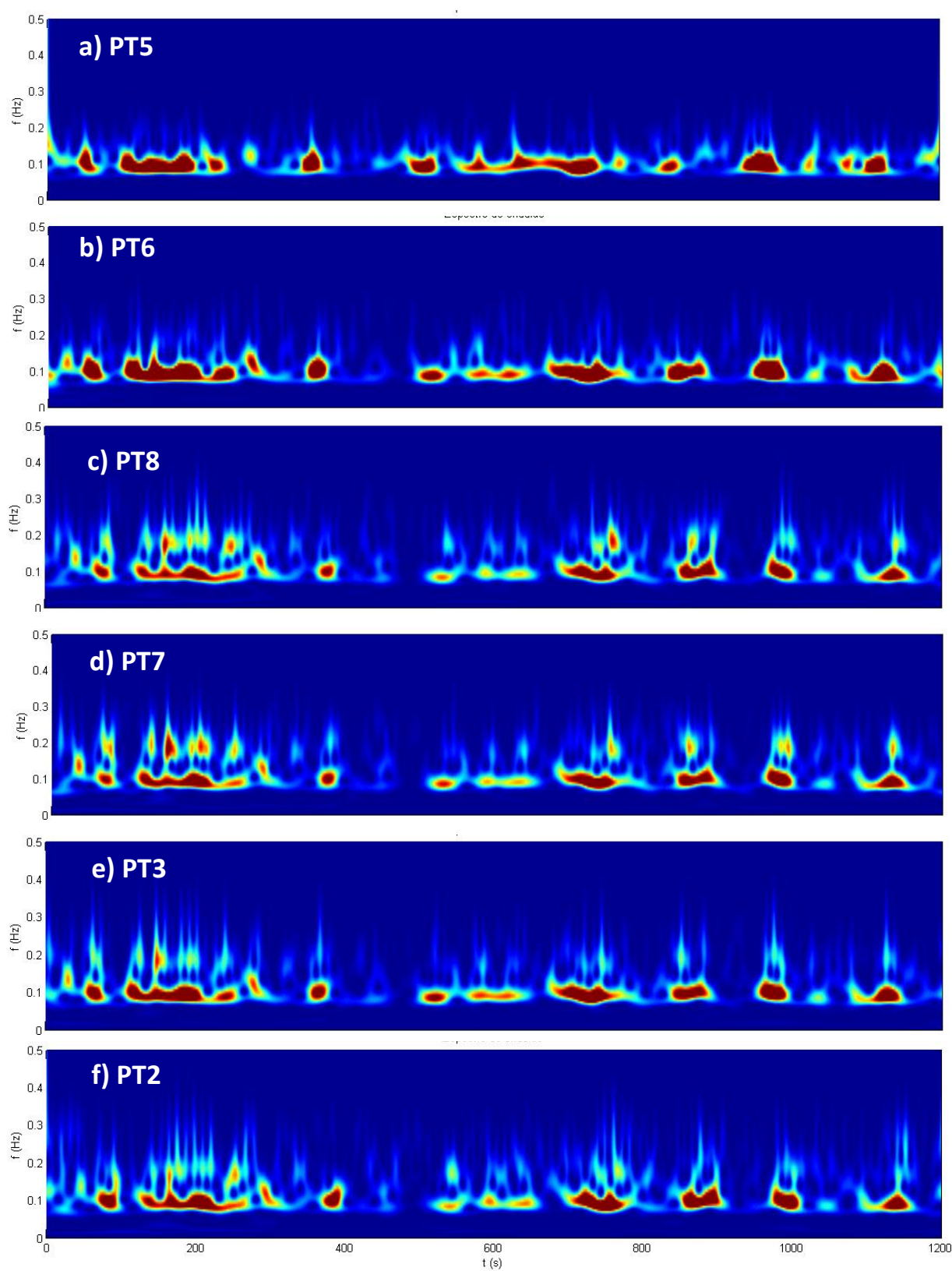
## Anexo XI – Espectros de Ôndulas para o Intervalo 5

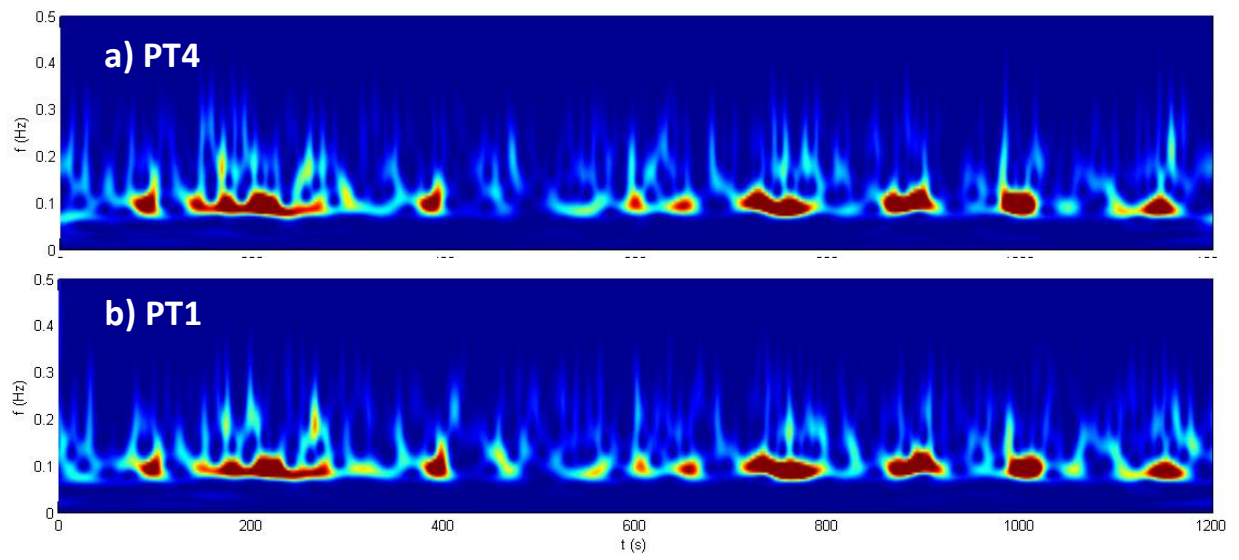




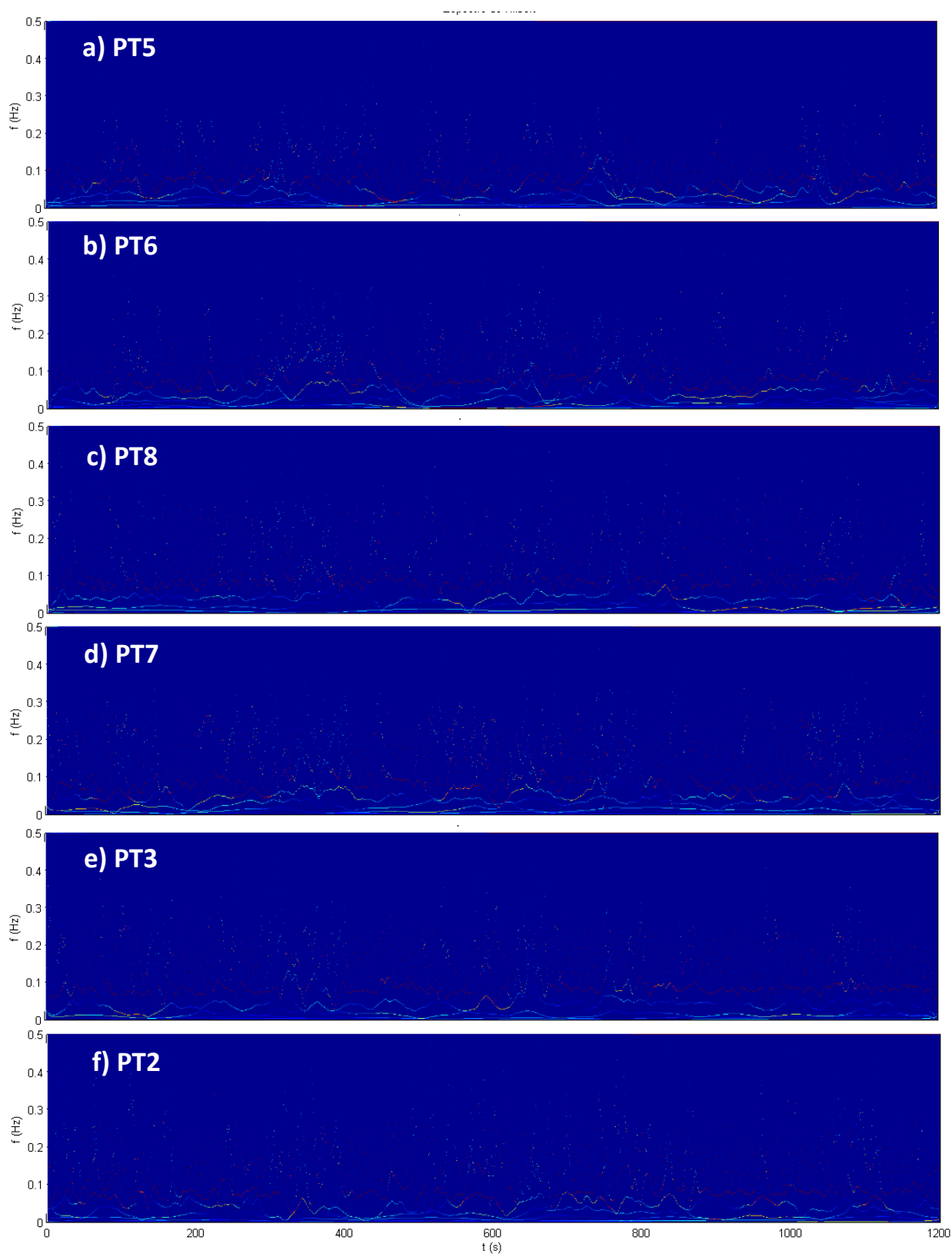


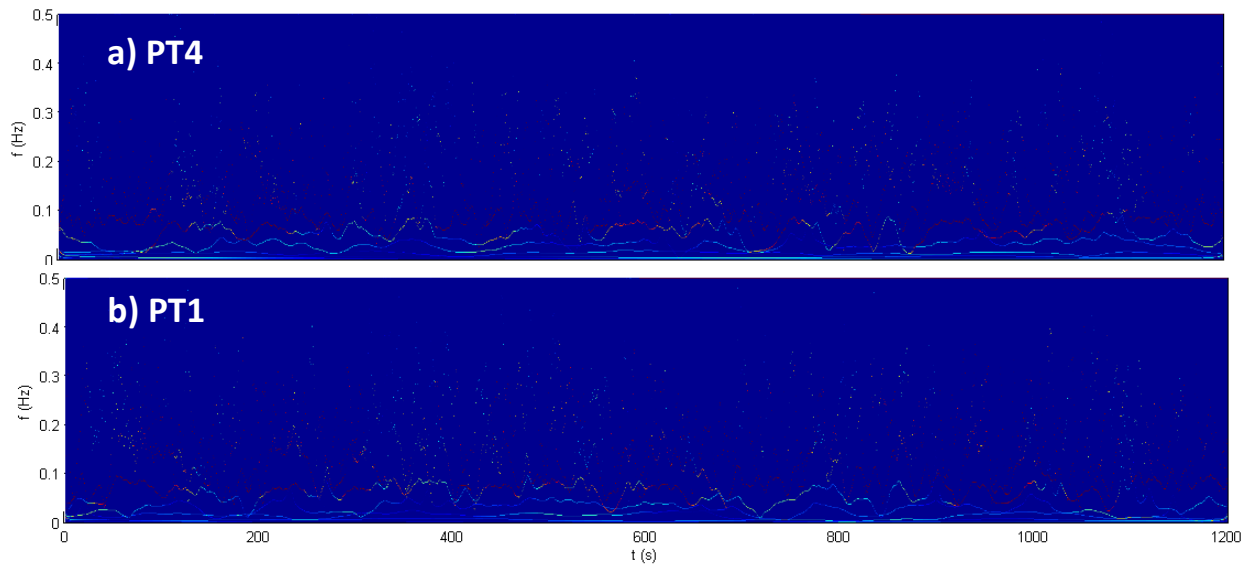
## Anexo XII – Espectros de Ôndulas para o Intervalo 6



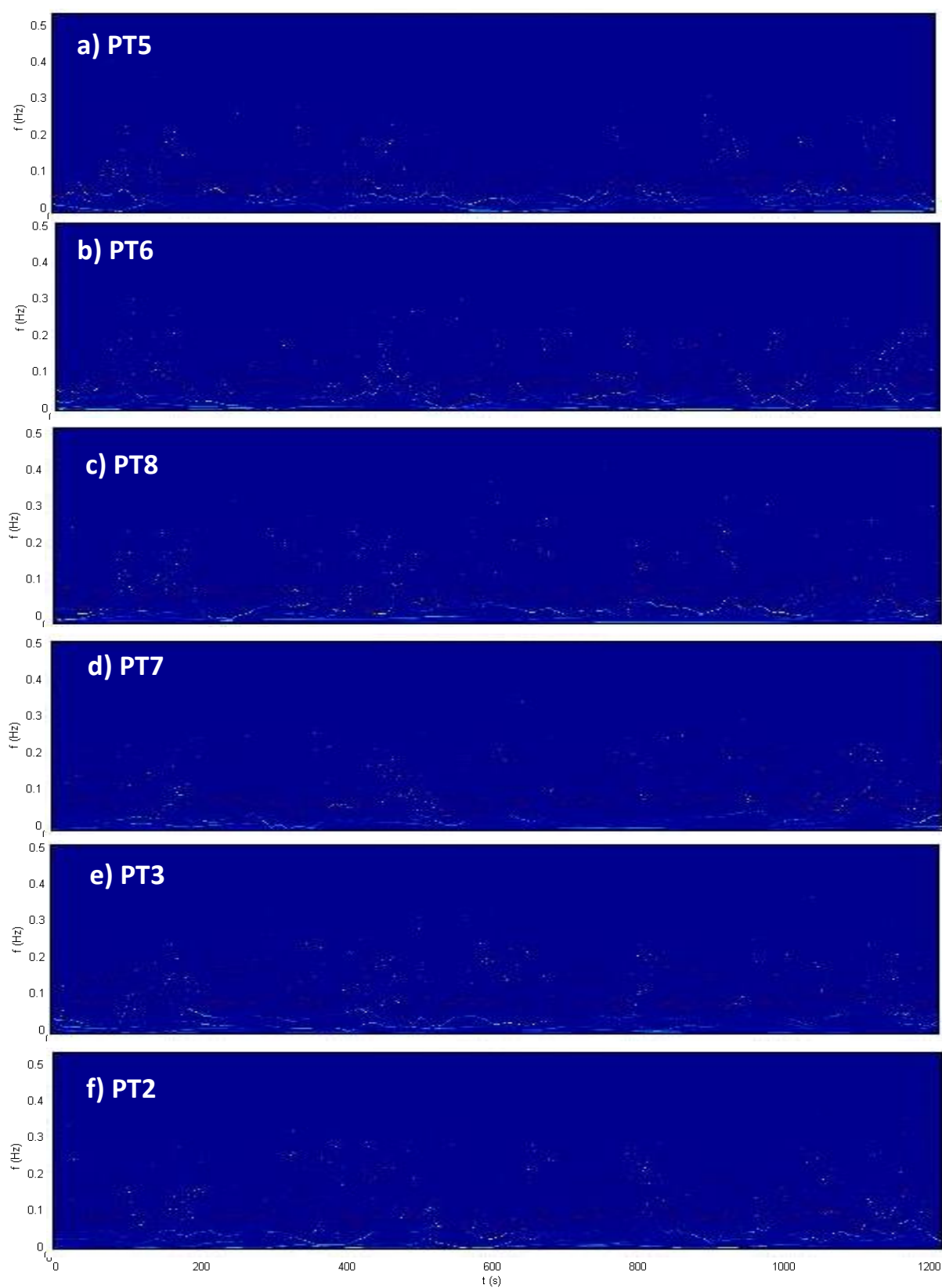


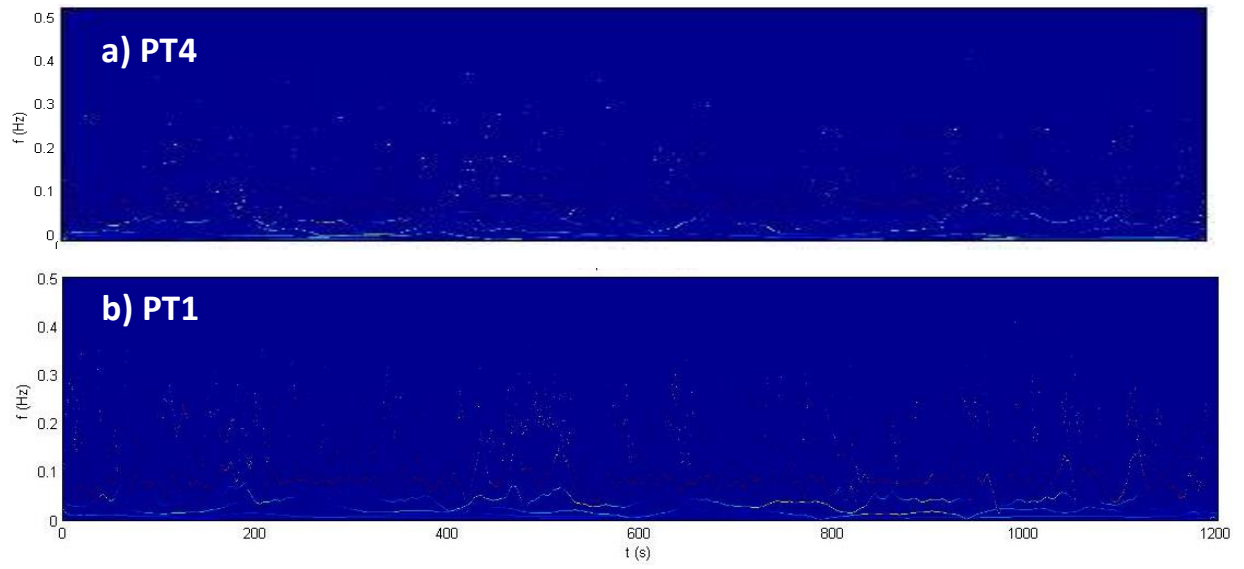
## Anexo XIII – Espectros de HHT para o Intervalo 1



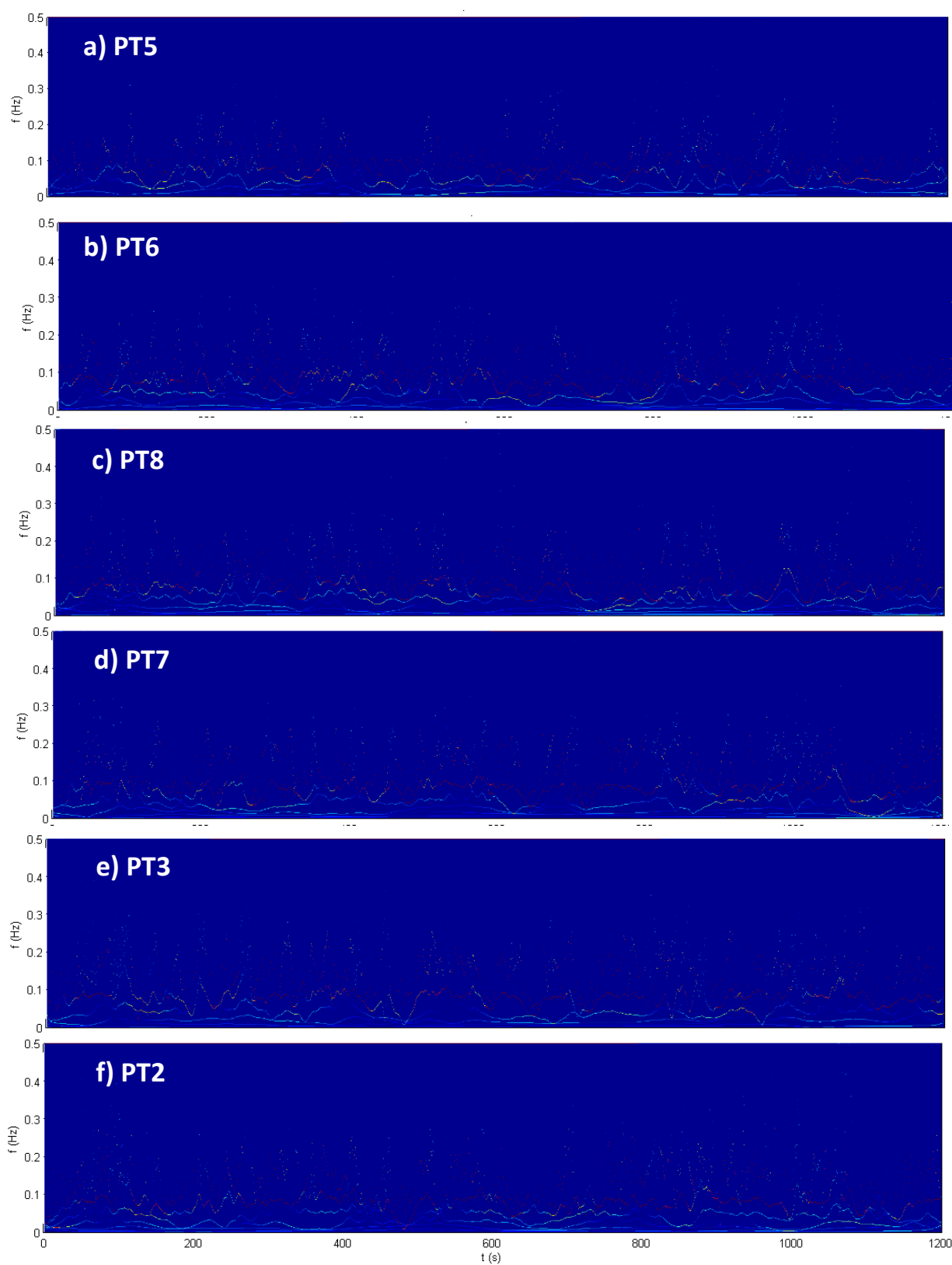


## Anexo XIV – Espectros de HHT para o Intervalo 2

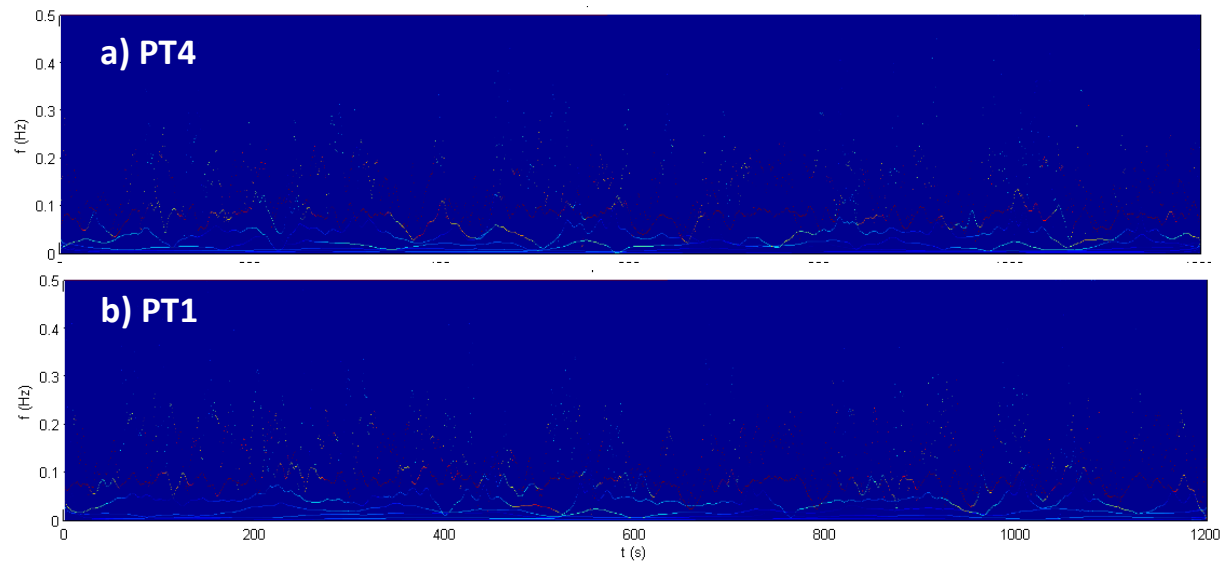




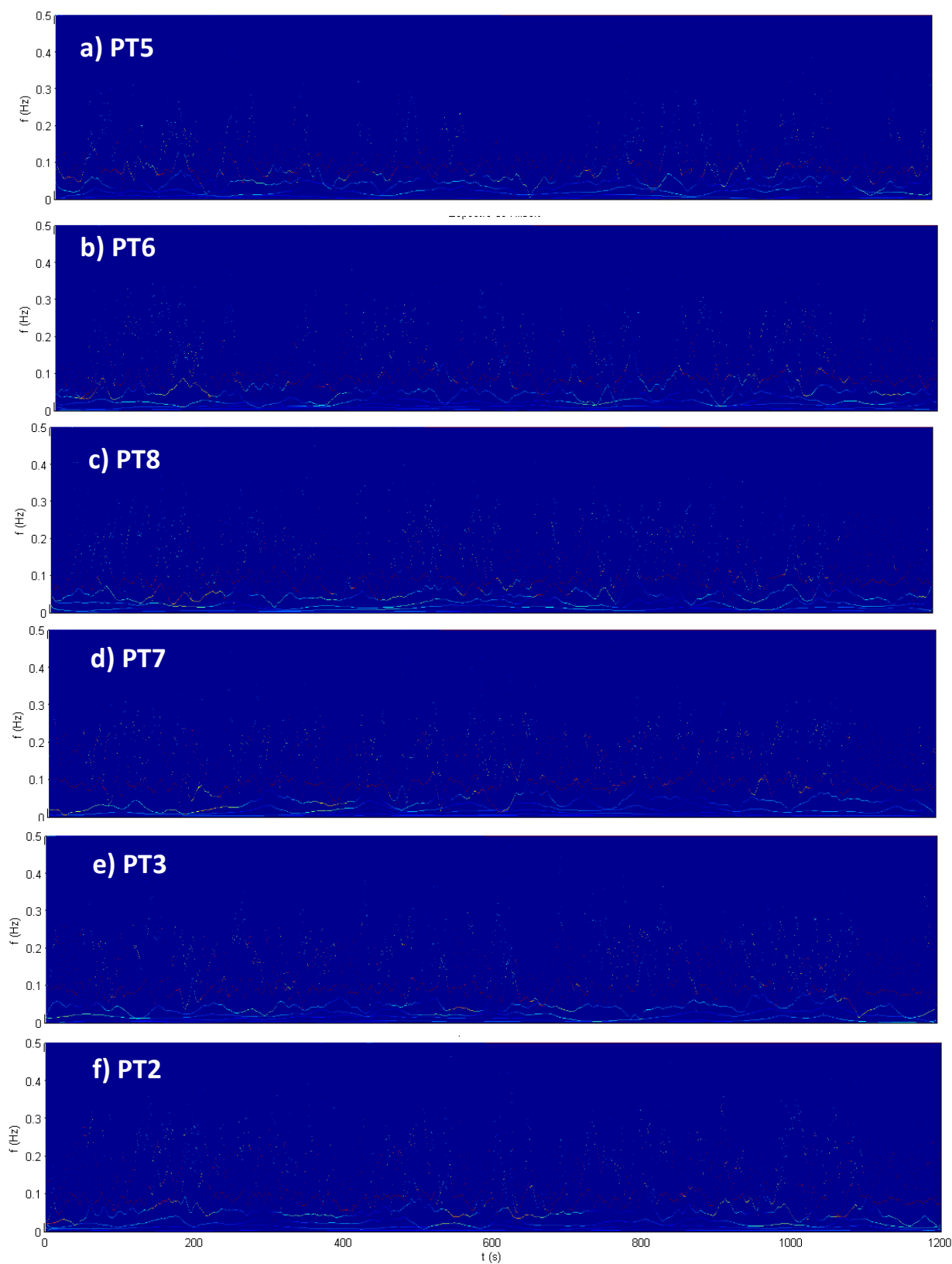
## Anexo XV – Espectros de HHT para o Intervalo 3

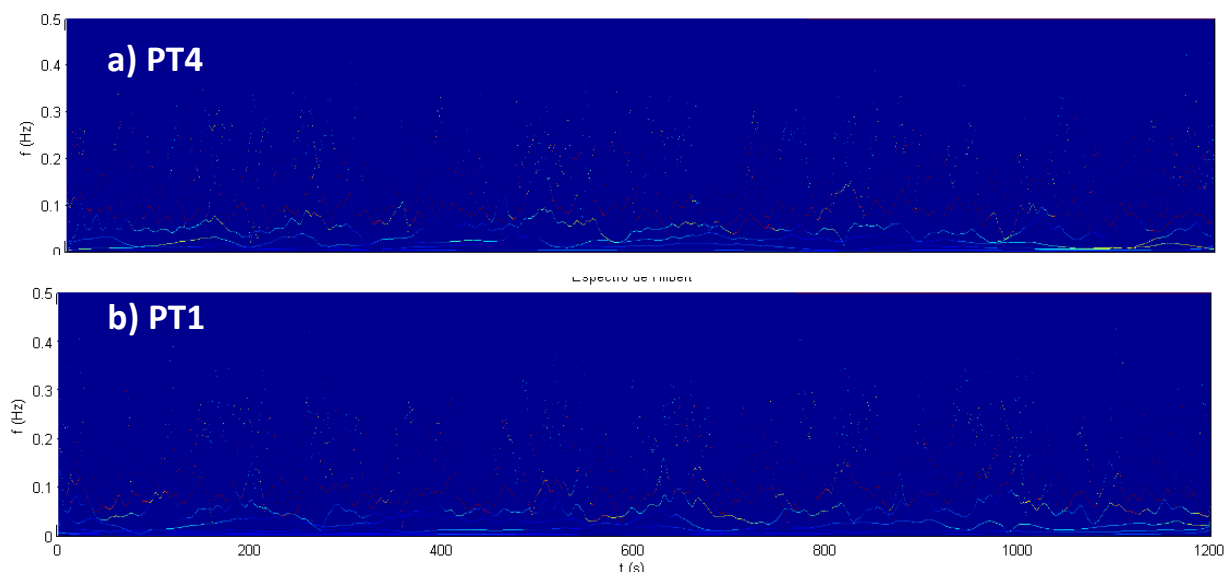




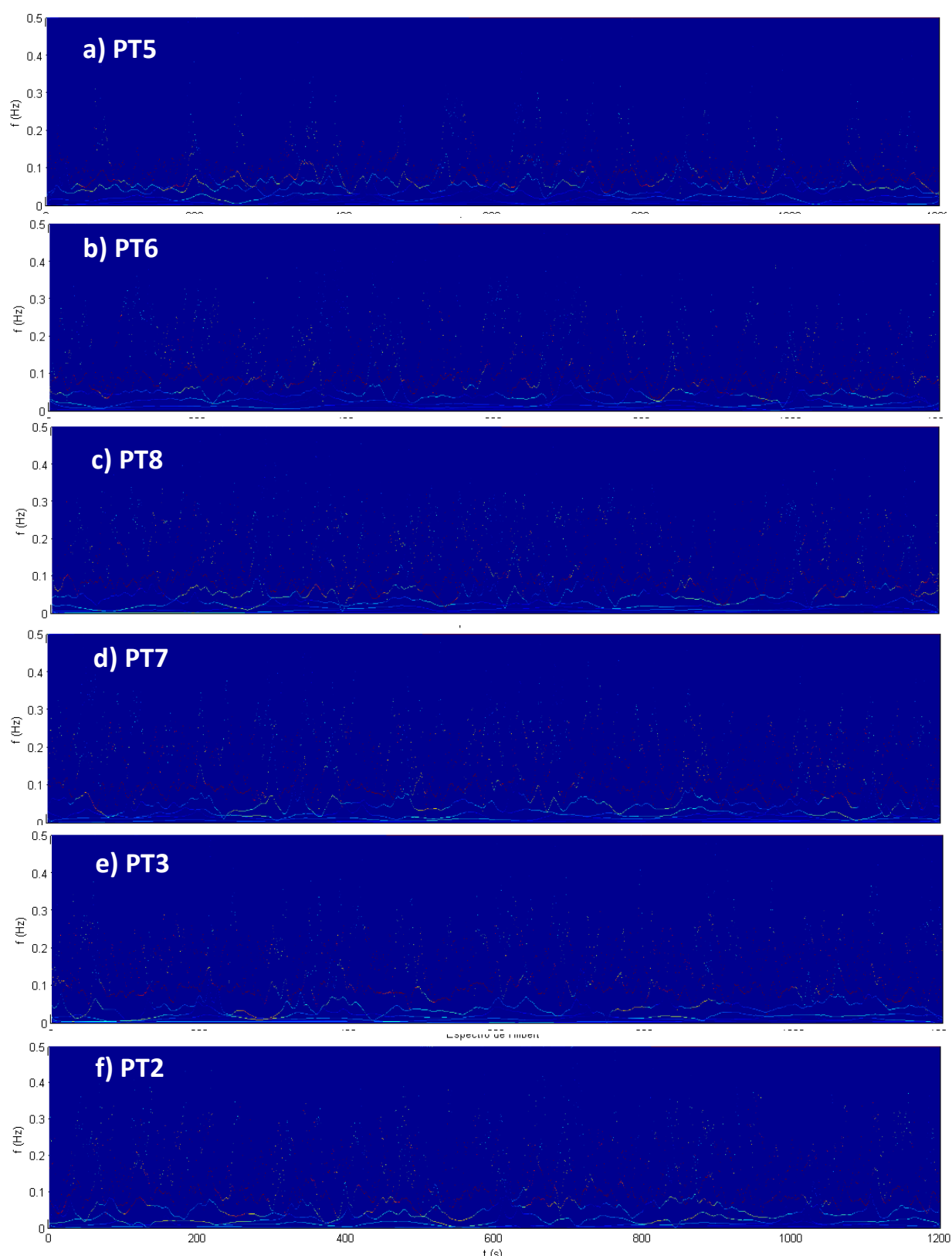


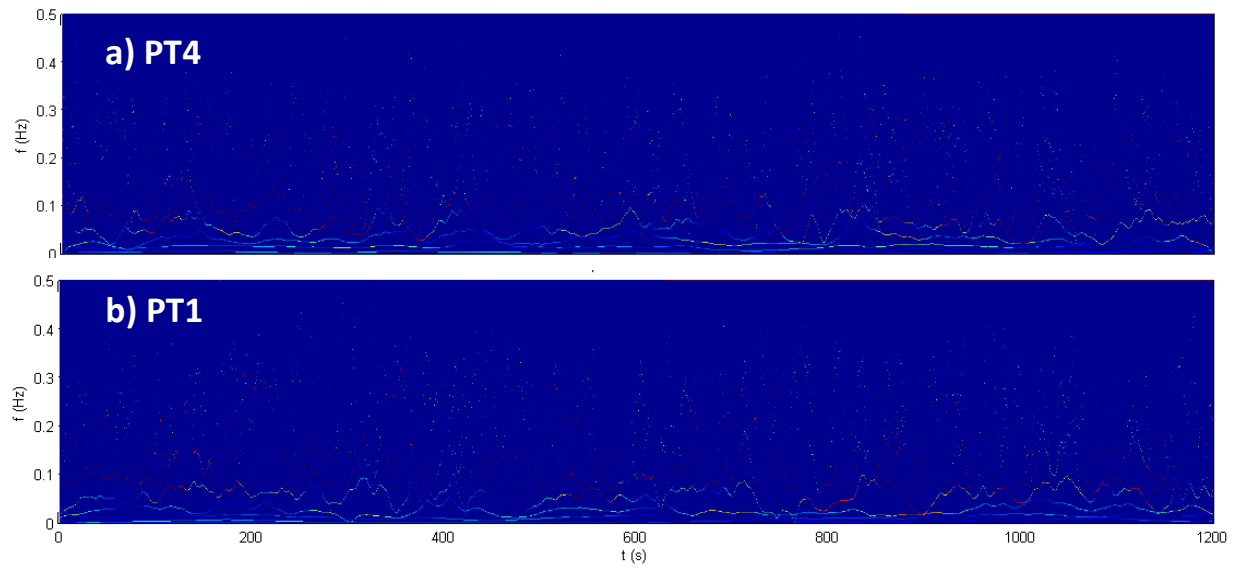
## Anexo XVI – Espectros de HHT para o Intervalo 4



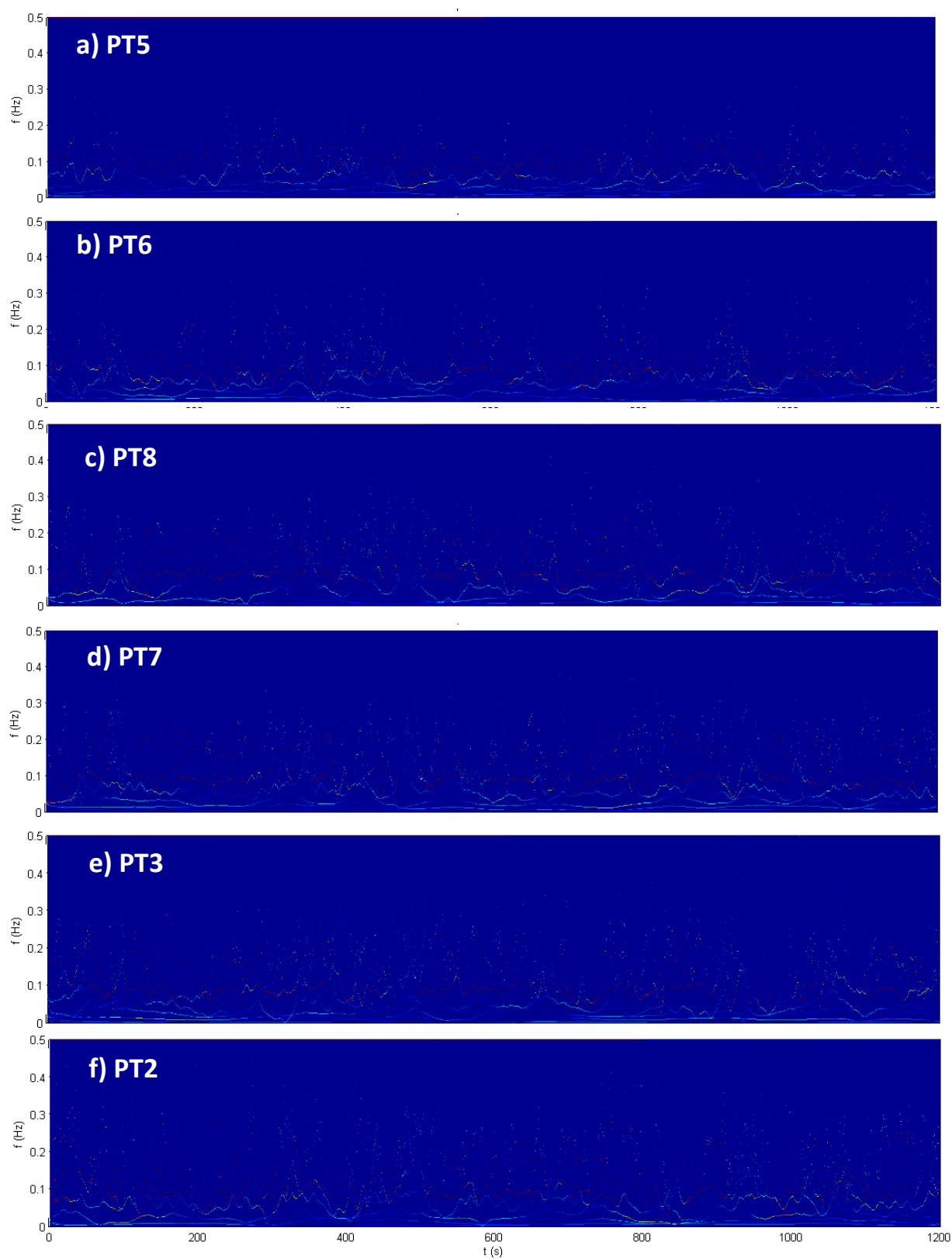


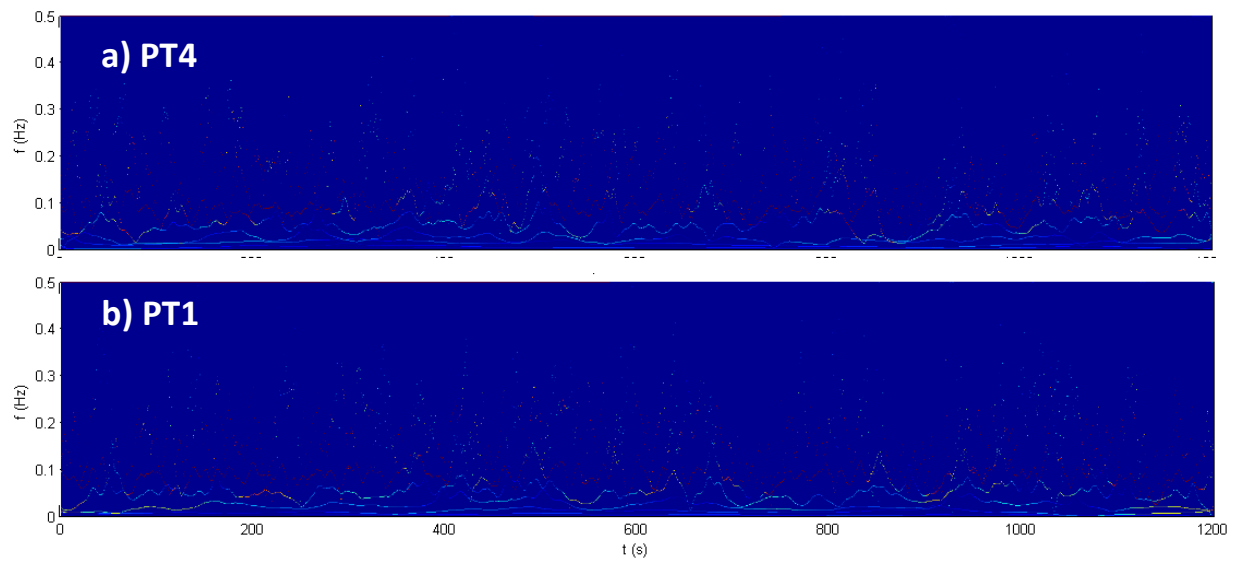
## Anexo XVII – Espectros de HHT para o Intervalo 5





## Anexo XVIII – Espectros de HHT para o Intervalo 6



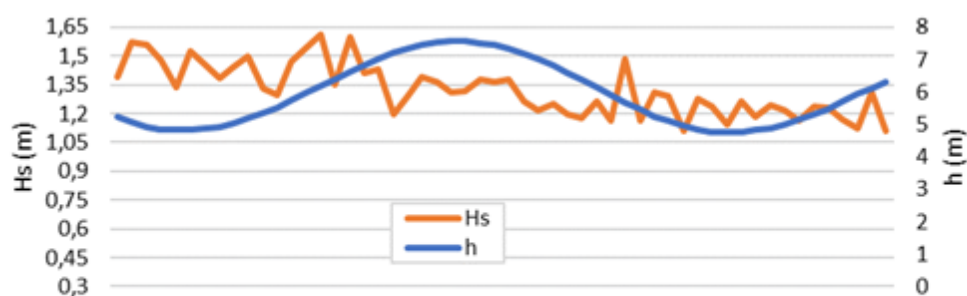


## Anexo XIX – ALTURA SIGNIFICATIVA (Hs) POR TEMPO (T)

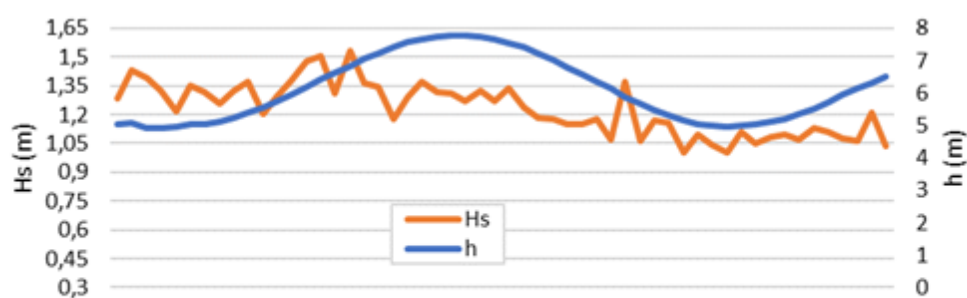
a) PT5



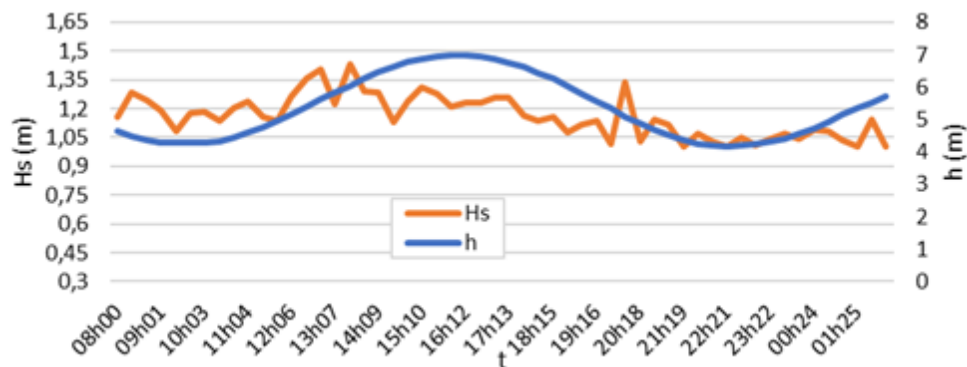
b) PT6



c) PT8

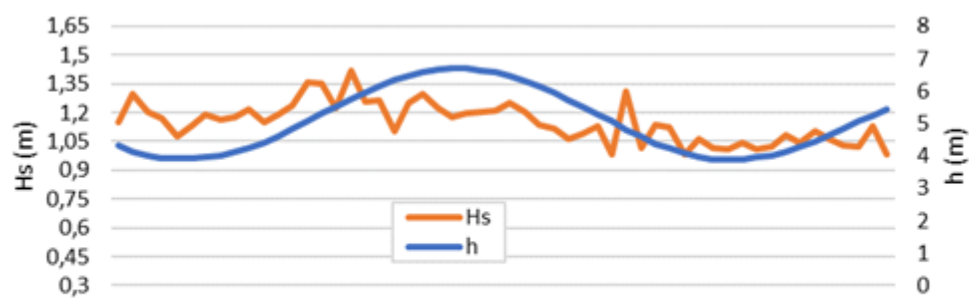


d) PT7

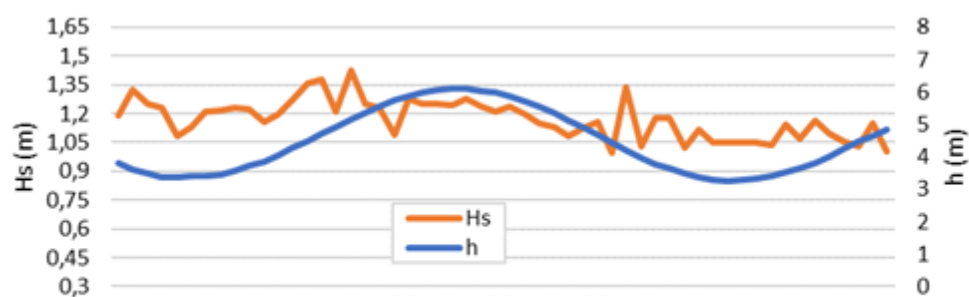




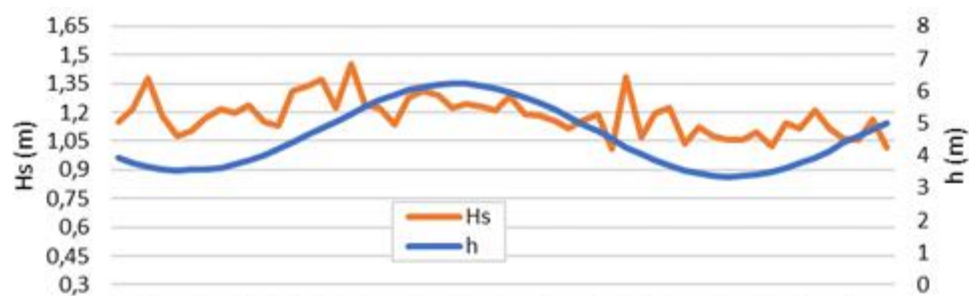
e) PT3



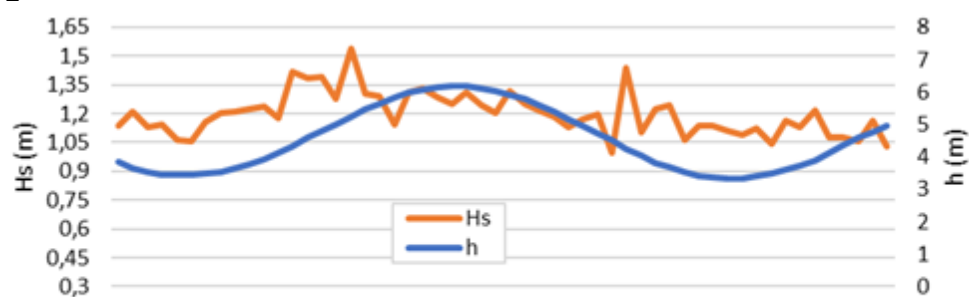
f) PT2



g) PT4

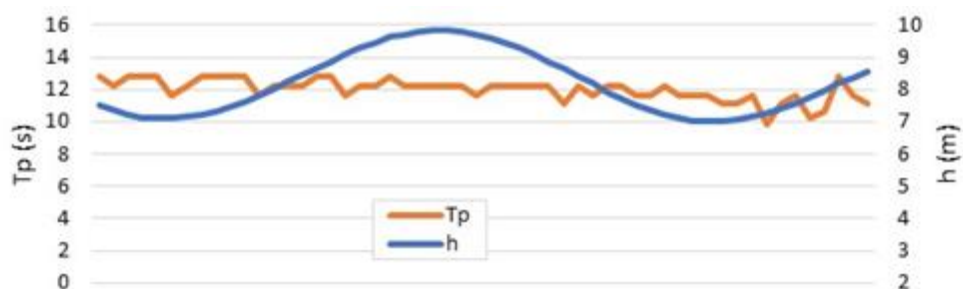


h) PT1

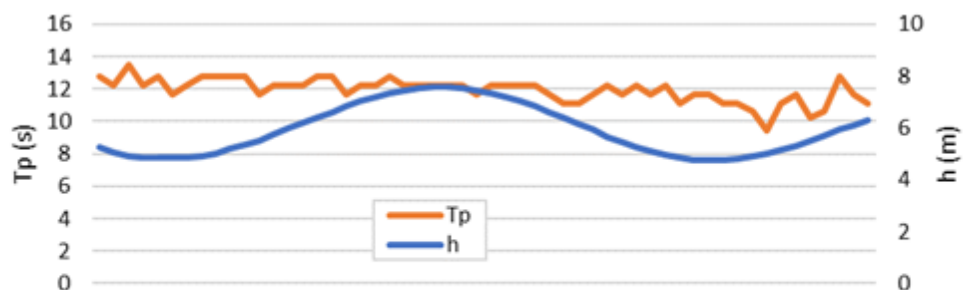


## Anexo XX – Período de Pico ( $T_p$ ) por Tempo (t)

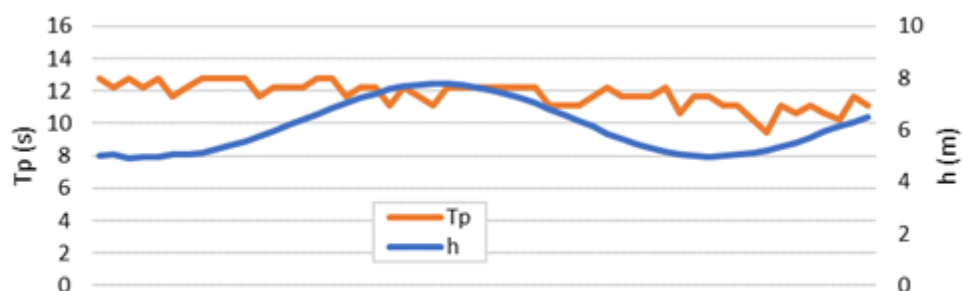
a) PT5



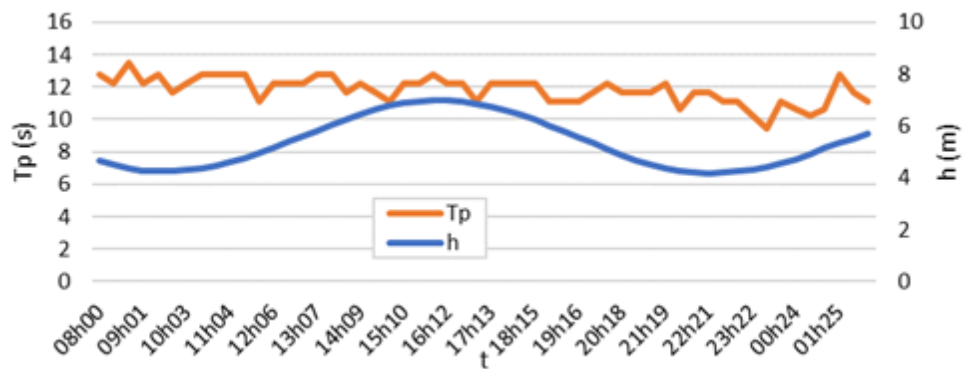
b) PT6



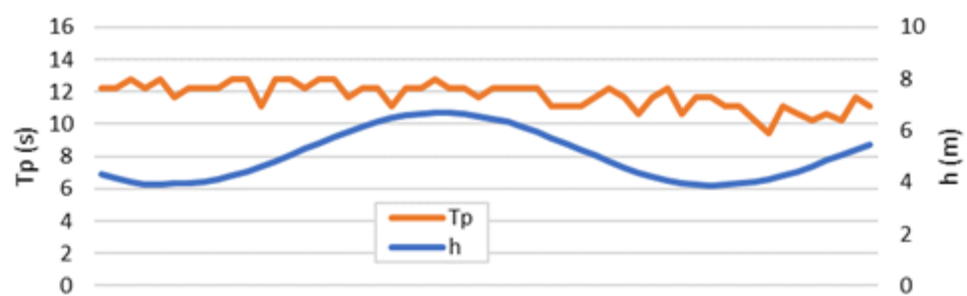
c) PT8



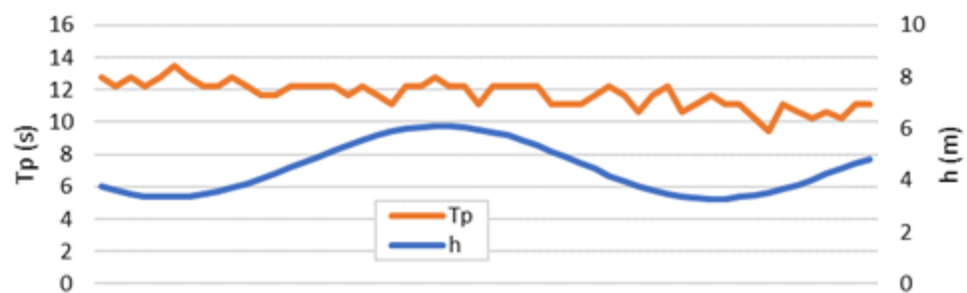
d) PT7



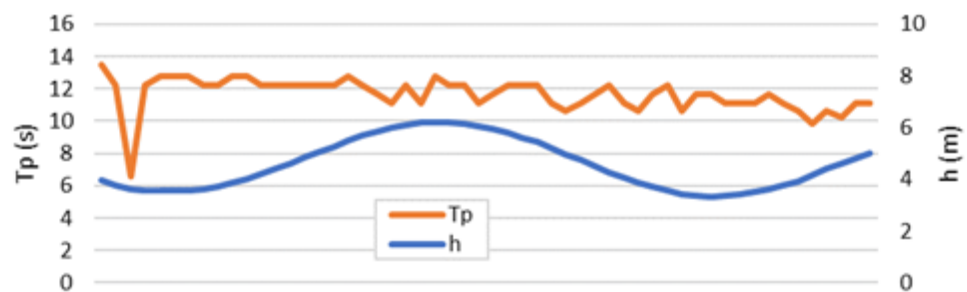
e) PT3



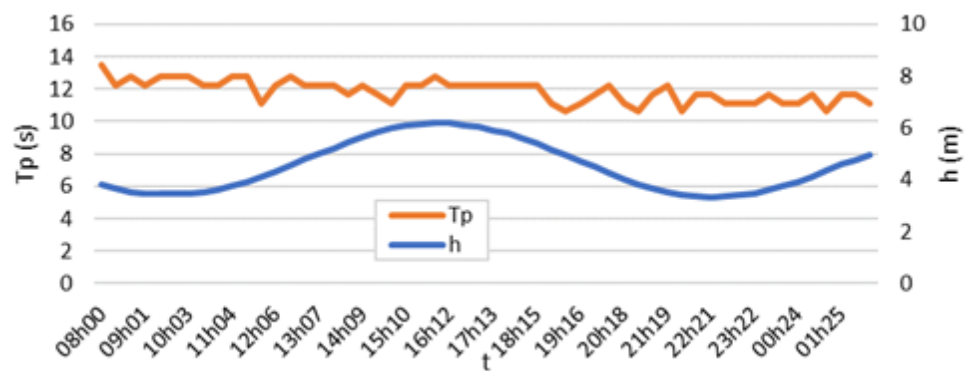
f) PT2



g) PT4

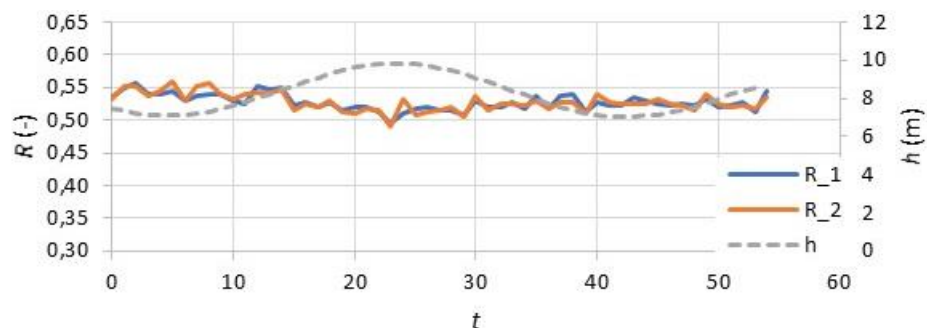


h) PT1

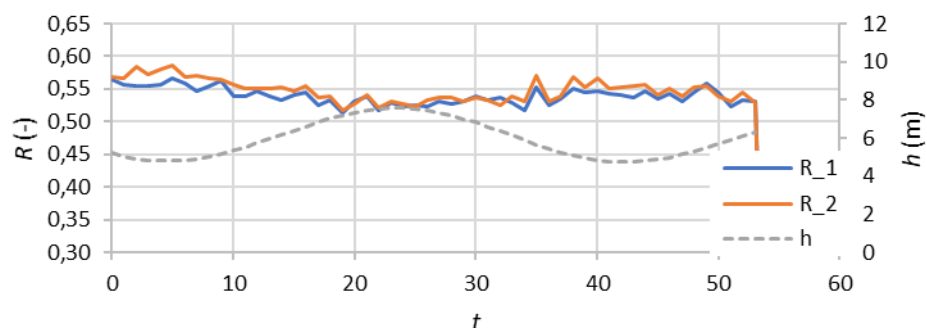


## Anexo XXI – Coeficiente de Assimetria das Velocidades (R) por Tempo (t)

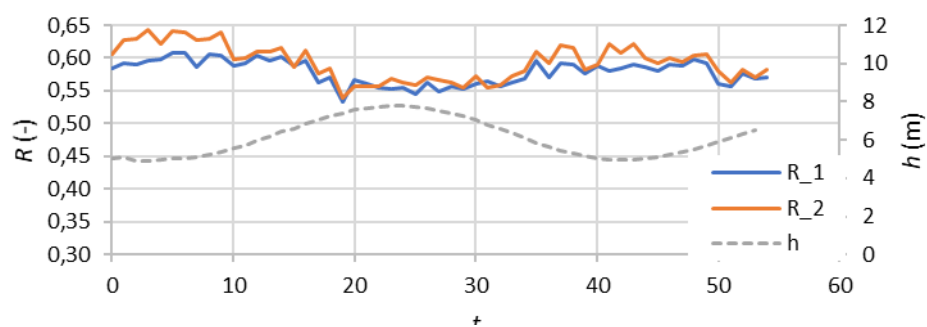
a) PT5



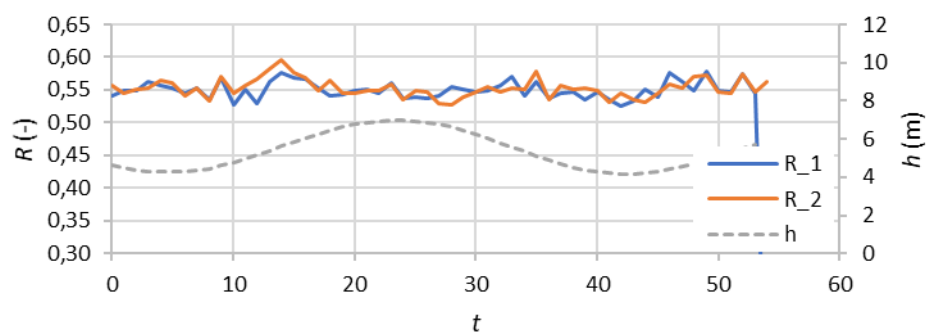
b) PT6



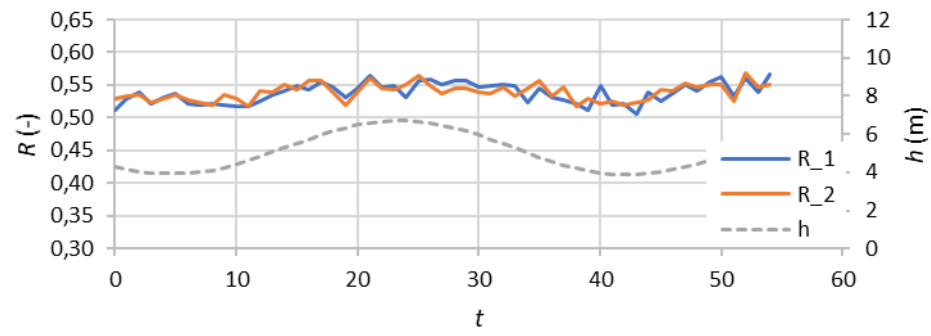
c) PT8



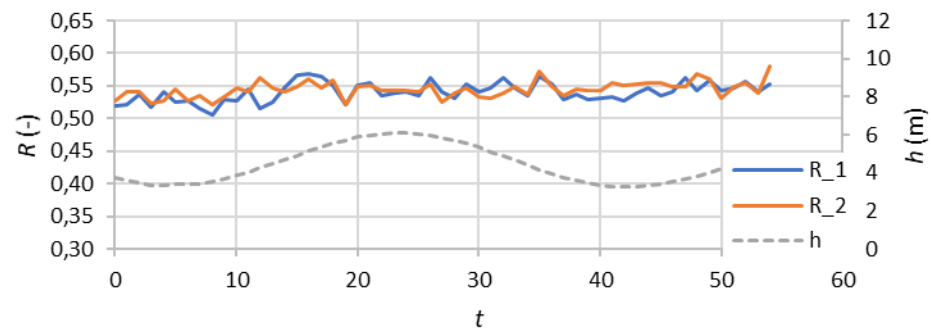
d) PT7



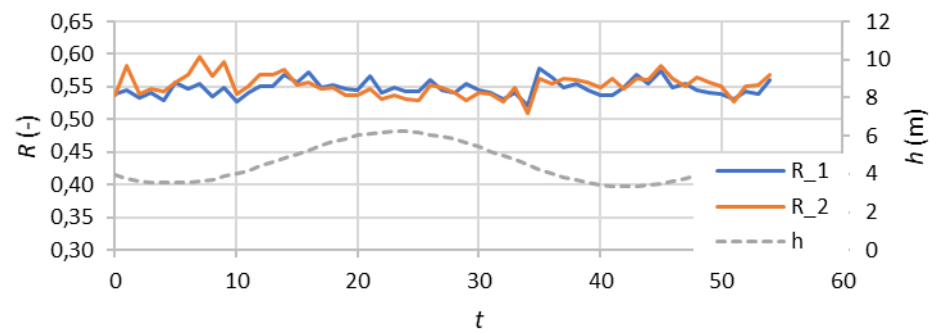
i) PT3



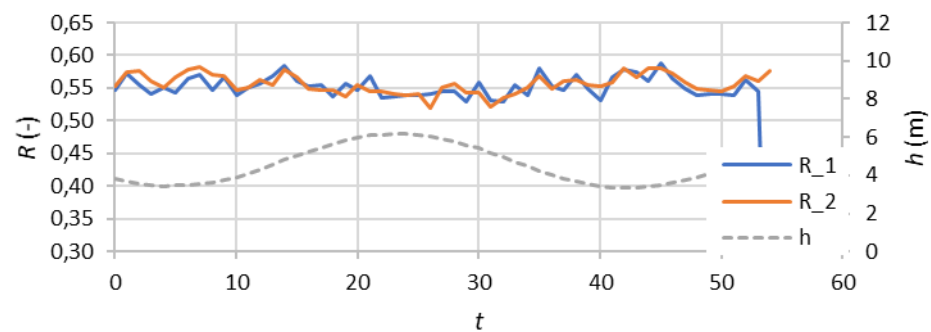
j) PT2



k) PT4

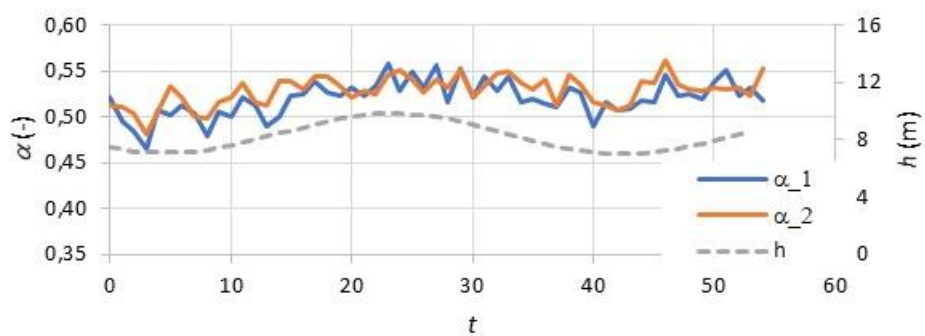


l) PT1

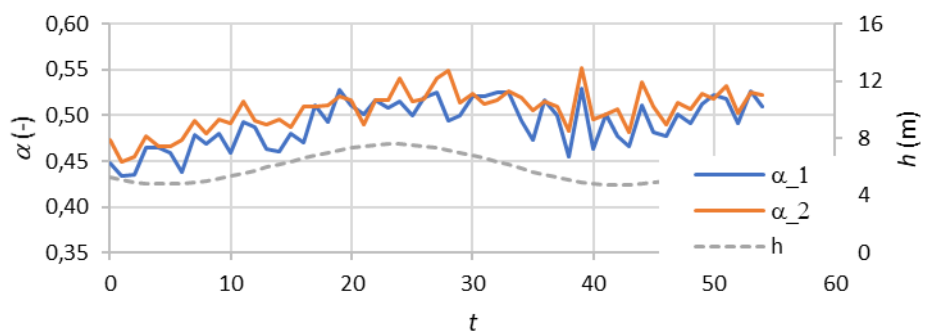


## Anexo XXII – Coeficiente $\alpha$ por Tempo (t)

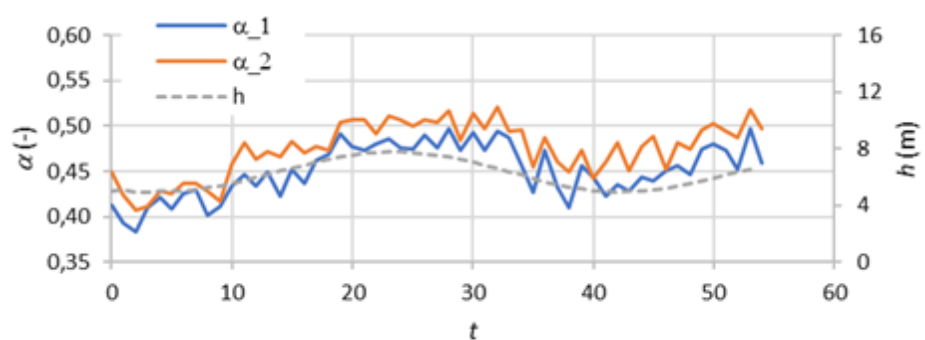
a) PT5



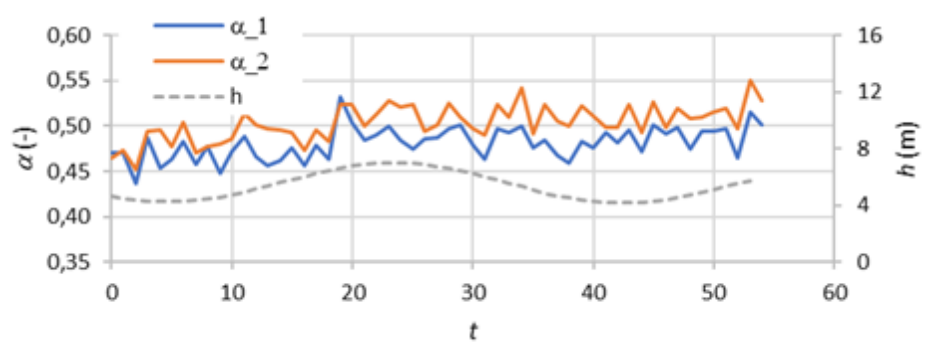
b) PT6



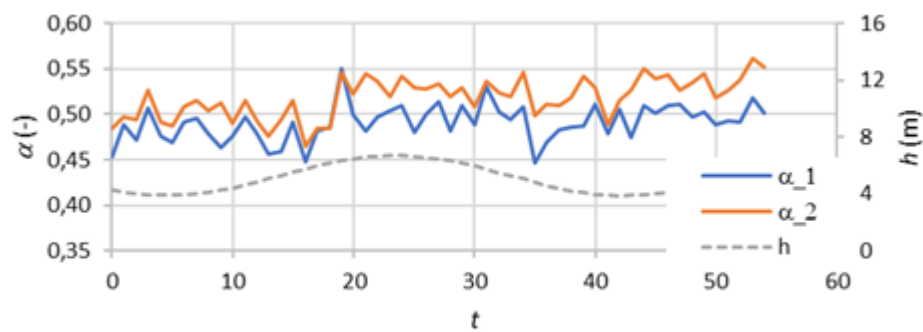
c) PT8



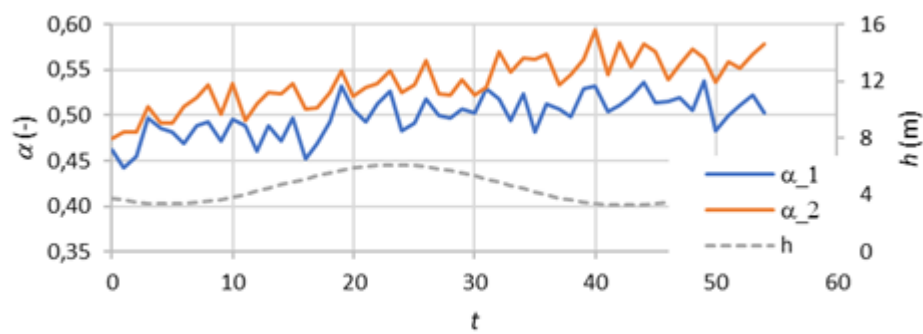
d) PT7



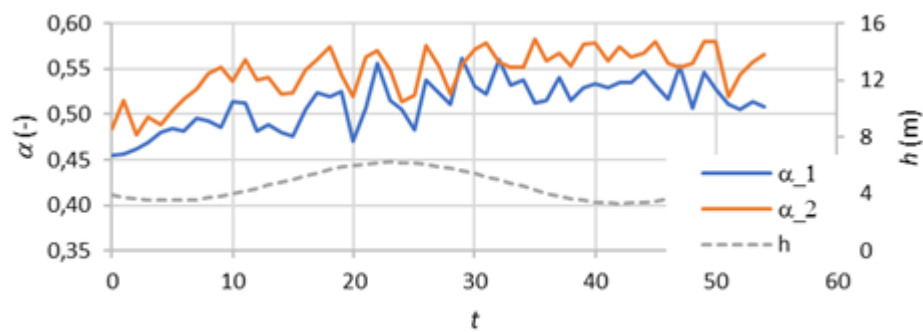
e) PT3



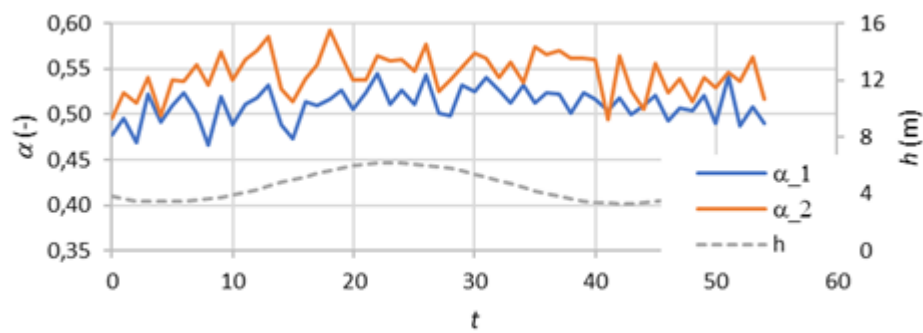
f) PT2



g) PT4

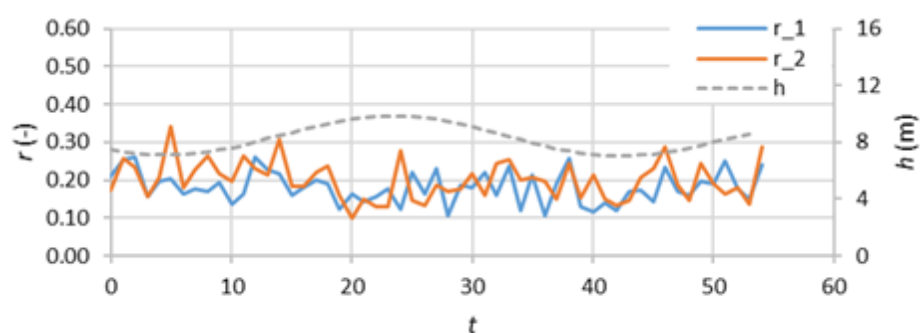


h) PT1

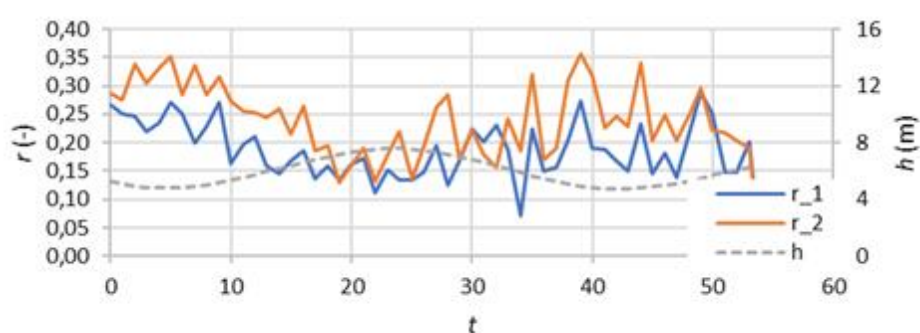


## Anexo XXIII – Índice Assimétrico ( $r$ ) por Tempo ( $t$ )

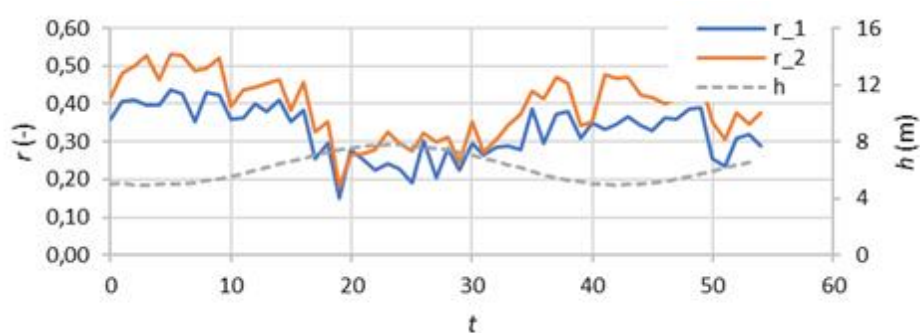
a) PT5



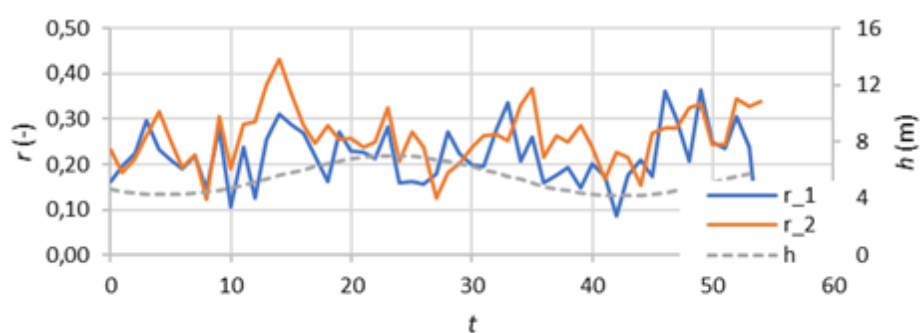
b) PT6



c) PT8

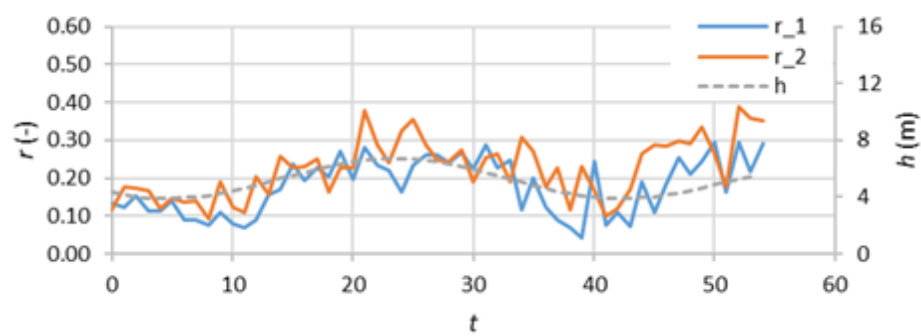


d) PT7

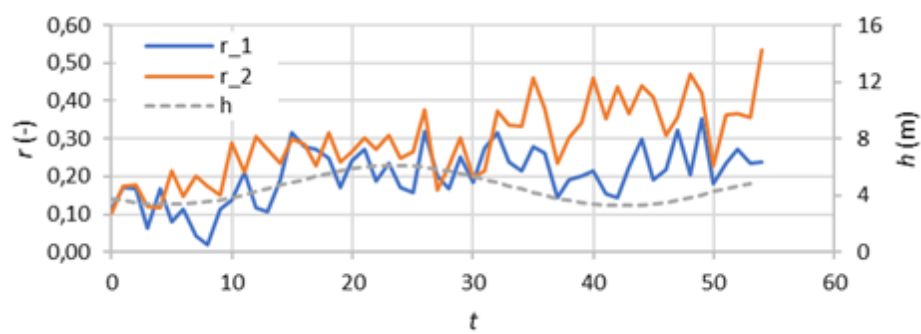




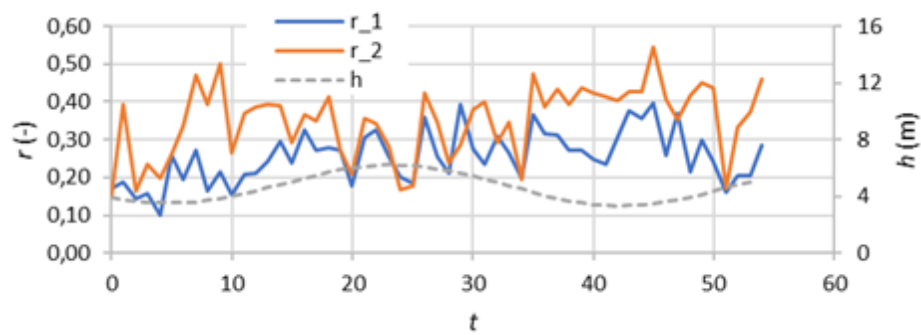
e) PT3



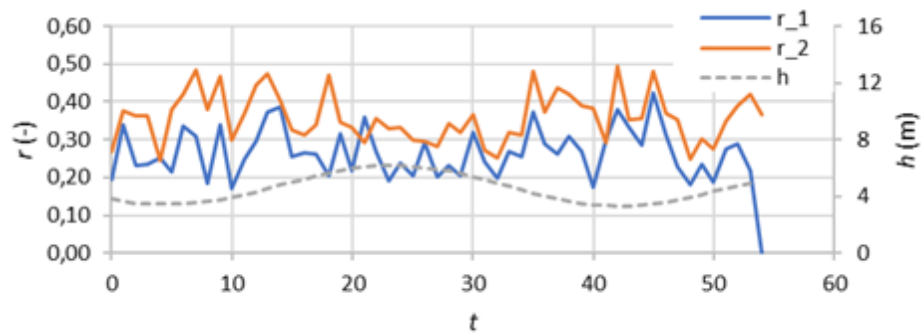
f) PT2



g) PT4

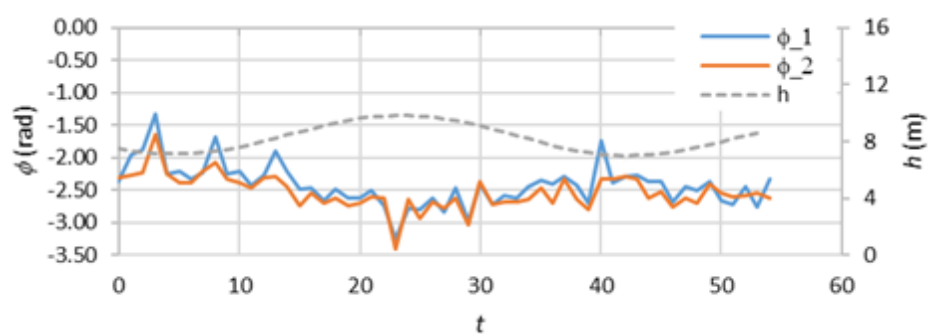


h) PT1

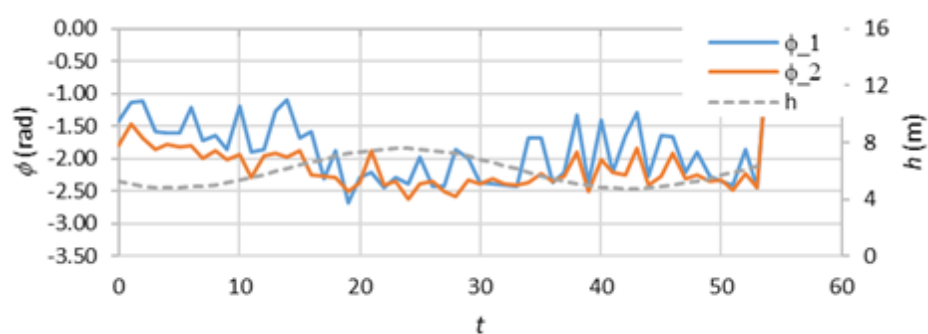


## Anexo XXIV – Parâmetro de Forma ( $\phi$ ) por Tempo ( $t$ )

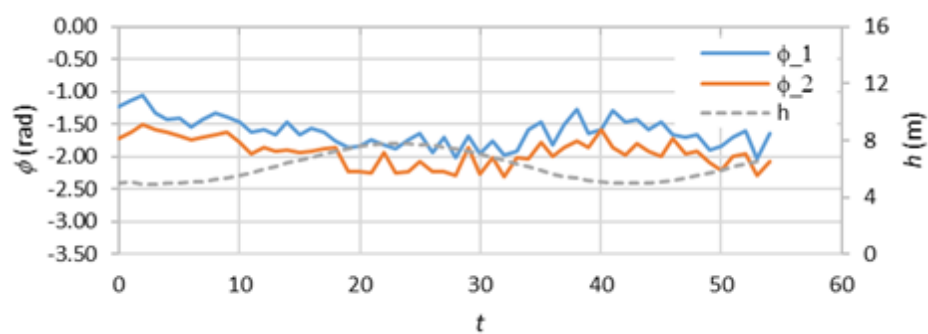
a) PT5



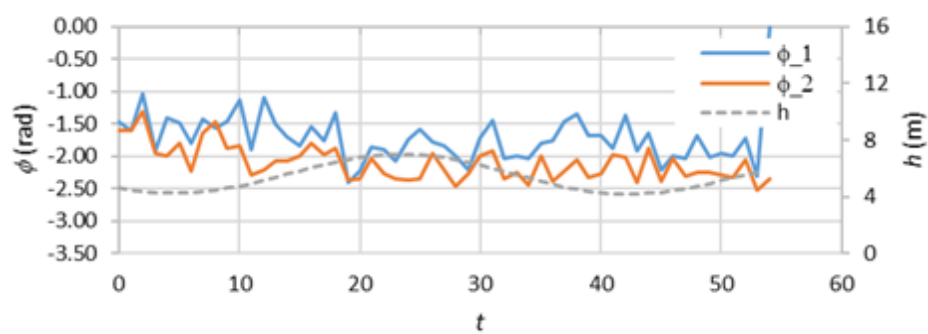
b) PT6



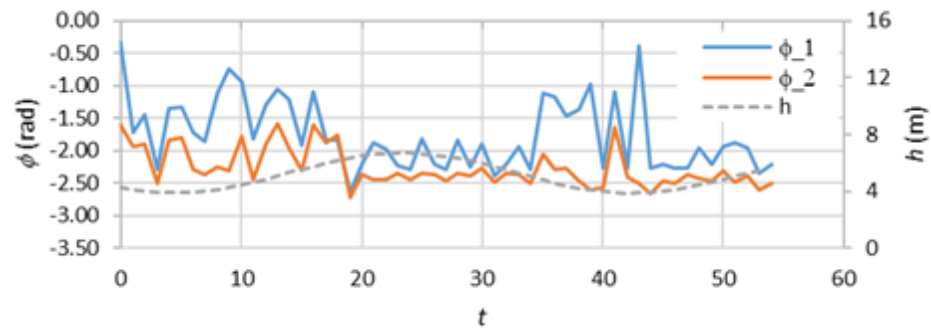
c) PT8



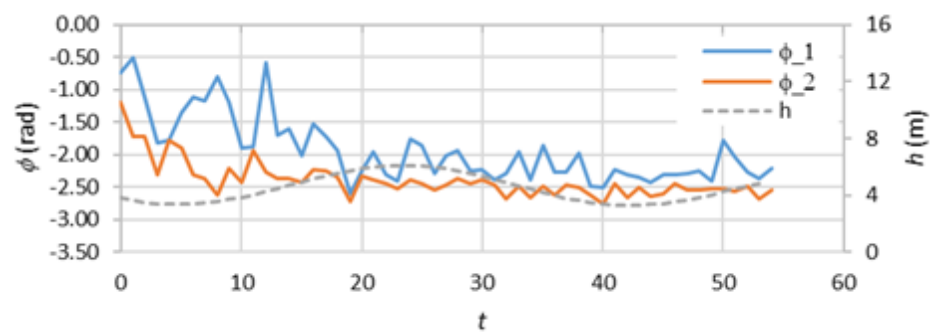
d) PT7



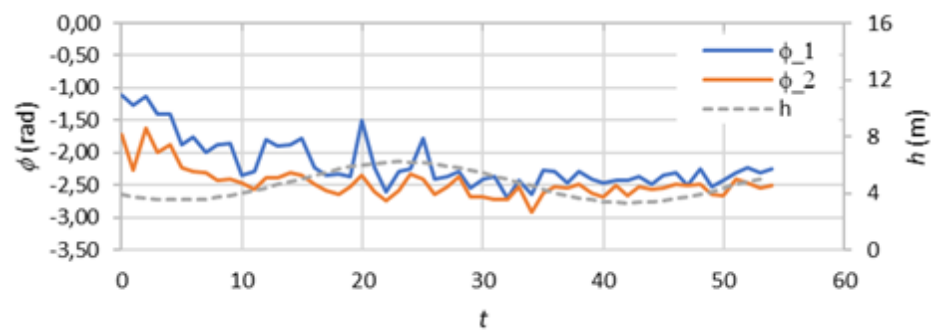
e) PT3



f) PT2



g) PT4



h) PT1

